欧姆社学习漫画

漫画电子电路

〔日〕田中贤一 / 著
〔日〕高山ヤマ / 漫画绘制
〔日〕株式会社TREND-PRO / 漫画制作
单美玲 / 译



科学出版社
www.sciencep.com

KindleDX出版署

✿前　言✿

电子电路以电气电路为基础，加上半导体元件即二极管和晶体管，发展为复杂的集成电路。说身边的电器都是由电子电路组成的也不为过。

为了初步理解电子电路的内容，本书以“使用晶体管的收音机”为题材，用漫画来简单说明收音机是通过怎样的结构来发出声音的。从来，电子电路方面的书籍很多都是从简单的放大电路开始说明，并逐步接触到复杂的电路。但是，本书大胆地按照信号的推移，就是说从接收到的电波中选择想听的频道开始，直到收听到声音的流程来进行说明。理解收音机系统的同时，就会通过从电波到声音的信号流程而自然地理解电子电路。作者通过漫画中出现的高中生紫电透和江令木绫的角色来进行有趣的说明。

本书以我在大学中电子电路的讲义为基础进行简单的说明，工科高中的学生和初学者都可以充分理解其内容。

在制作本书之际，向负责漫画绘制的高山ヤマ，负责漫画制作的TREND-PRO 公司的诸位，以及给予我执笔机会的欧姆社的各位编辑表示感谢。而且，也衷心感谢购买本书的各位读者， 同时，如果大家通过阅读本书对电子电路知识产生了兴趣，将是我莫大的荣幸。

田中贤一

✿目　录✿

序　章　怦然心动☆新会员　1

第 1 章　何为电子电路　9

✿ 1. 电子电路是什么　11
✿ 2. 各种电子电路　13
・放大电路　13
・振荡电路　14
・调制电路　15
・检波电路　16
・滤波器　16
・运算放大器　18
・逻辑电路　19
・电源电路　21
✿ 3. 以收音机为例　23
✿ 补充知识　27
・运算放大器——最终的放大电路　27
・逻辑电路　28

第 2 章　晶体管的结构　31

✿ 1. 何为半导体　34
・硅的共价键　36
・P 型半导体　38
・N 型半导体　39
✿ 2. PN 结二极管　40
・偏　压　41
・整流电路　43

✿ 3. 双极晶体管 44
· PNP 型晶体极管 46
✿ 补充知识 54
· J-FET 的结构与原理 54
· MOS-FET 55
· 双极晶体管与 FET 的差异 56

第 3 章　电气电路的知识 57

✿ 1. 基尔霍夫定律 62
· 电路分析 62
· 基尔霍夫的第 1 定律和第 2 定律 63
✿ 2. *RLC* 并联电路 65
✿ 3. h 参数等效电路 67
✿补充知识 75
· 电压源与电流源 75
· 电压放大率 75
· 电流放大率 76
· 关于虚数 i 与 j 76

第 4 章　调谐放大电路 77

✿ 1. 调谐放大电路的原理 81
· 何为振幅调制波 83
· 振幅调制波的波形 84
✿ 2. 单一调谐放大电路 88
· 短　路 90
· 高频等效电路 91
· 寄生容量与镜子效应 92
· 高频等效电路的化简 95

✿ 补充知识 101
· 调谐放大器中的电流放大率的频率特性 101
· 晶体管的高频等效电路 103
· 阻抗的转换 105

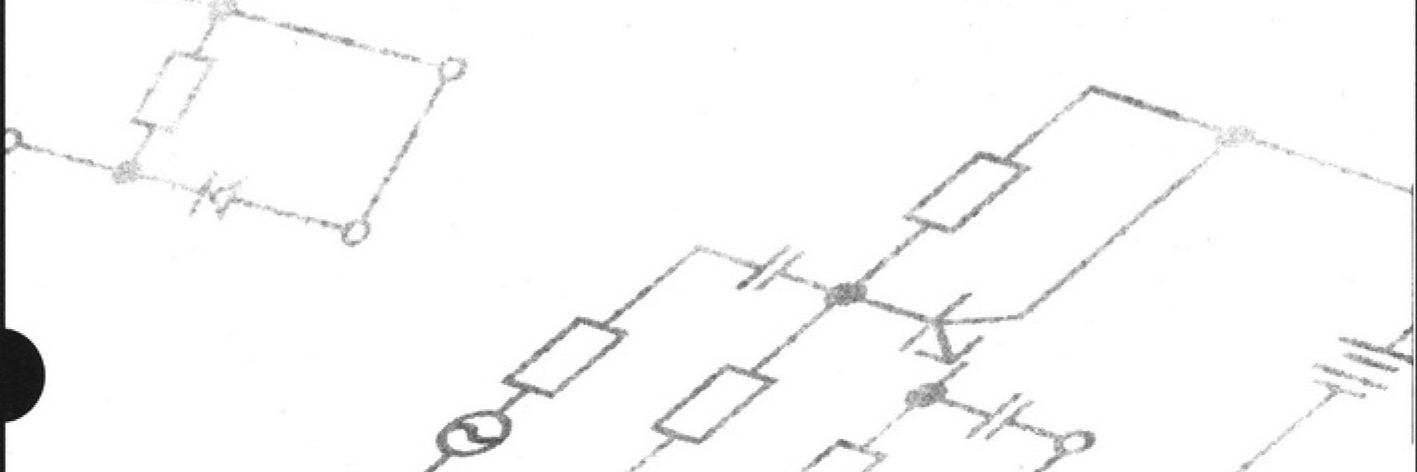
第 5 章 检波电路 107
✿ 1. 检波与线性检波电路 110
· 检 波 111
· 线性检波电路 111
· 线性检波的原理 112
✿ 2. 包络检波 114
✿ 3. 滤波器 115
· 低通滤波器 115
· 高通滤波器 116
✿ 补充知识 122
· 关于 FM（频率调制） 122

第 6 章 低频放大电路 125
✿ 1. 低频放大电路的概念 130
· 3 个类型的放大电路 131
✿ 2. 发射极接地放大电路 132
· 2.1 等效电路 133
· 2.2 偏压电路 134
· 何为静态工作点 136
· 最佳静态工作点 137
· 2.3 交流放大电路 138
· 交流成分的等效电路 139
· 2.4 电流放大率 141
· 基极接地电流放大率 143

· 相位的反转 144
· 2.5 输入输出的阻抗 145
· 输入阻抗 Z_{in}（1） 145
· 输出阻抗 Z_{out}（1） 146
✿ **3. 集电极接地放大电路** **148**
· 3.1 发射极耦合电路 148
· 缓冲器 148
· 3.2 偏压的设定 150
· 3.3 交流等效电路 151
· 3.4 电压放大率和电流放大率 155
· 电流放大率 155
· 电流放大率 156
· 3.5 输入输出的电阻（2） 157
· 输入阻抗 Z_{in}（2） 157
· 输出阻抗 Z_{out}（2） 158
✿ **补充知识** **160**
· 与分贝（dB）的关系 160
· 为什么发射极耦合电路是必需的 160
· 将发射极耦合电路级联连接 161
· 放大器的级联连接 162
· 放大器的高频特性 164

序　章

怦然心动☆新会员




○×高中
有时间的话来看看。
好的！
橄榄球
拜拜！
嗯，钳子在哪儿？
钳子！


……
电子社
电子社
招募会员
怎么一个新会员
也没有啊……
唉……
!?
拜托——!!!
啊!!


啊？
有什么事吗？
啊！
那个，那个，那个……
……
哦！
莫非是希望加入？
招募会员
我很高兴，
我正等着谁来呢！
你也喜欢电子制作吗？
啊？！！
啊？是！
是的！



喜欢，喜欢!!!
啊
是，是的，
我……
……
嗯？
不是，
是那个喜欢。
喜欢电子制作？对的！特别喜欢电子制作。
但怎么说呢，我不太熟悉，也可以说完全不懂，一窍不通！
不过，我对它有兴趣，虽然有点自不量力，希望参加社团活动得到你的指导。
加油
加油！
呃
对，
我是一个普通的高中女生，虽然有些傻瓜、笨蛋、痴呆……但我们可以好好相处吗？
……


嗯，也就是说，
你想入社，但完全没有这方面的基础，希望我可以指导你，是这个意思吗？
是的！
就是那样的。
嗯，好呀！
哈
但是，不行。
我真的是什么都不知道。
首先，是啊，先学会制作简单的收音机吧！
那样就可以掌握电子电路的基本知识了！
因为我会把各种知识都教给你的！
当

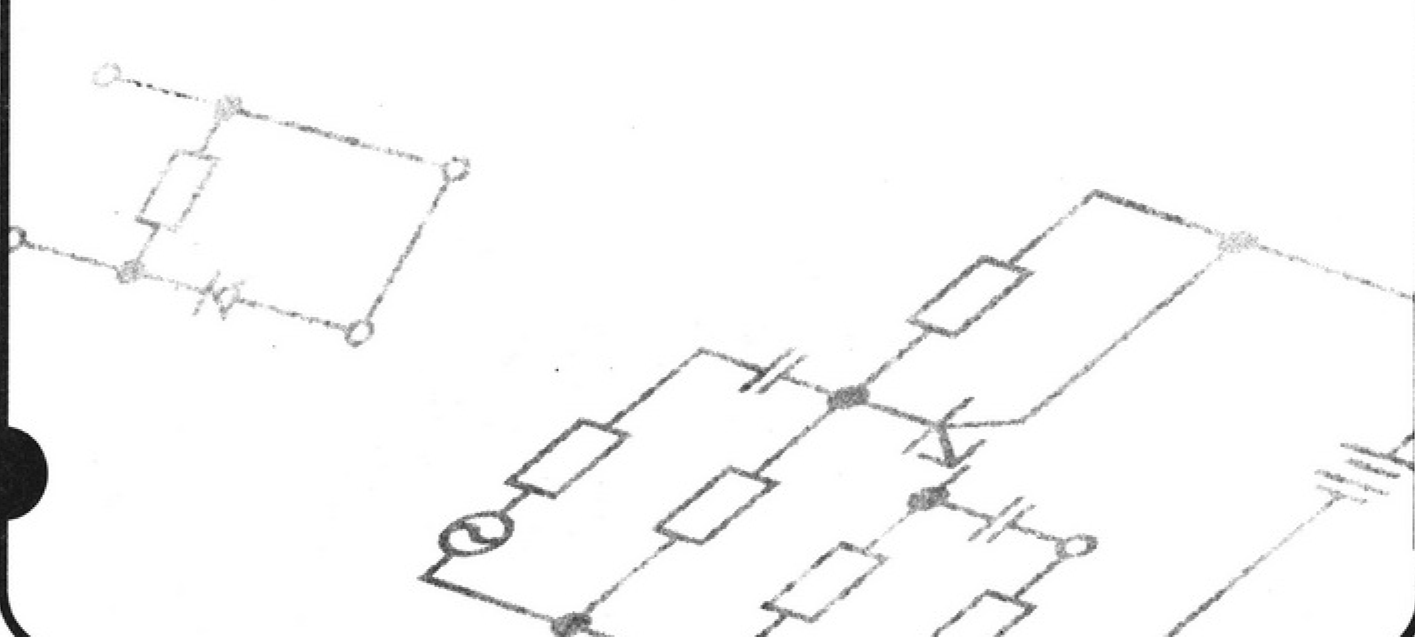


真，真的可以吗？
哈
当然！
虽然有点不好意思，这个社团活动现在只有我一个人在做，一直是一个人，很孤单来着。
我，紫电透，作为这个社团的代表欢迎你的加入！
可以入社！！？
一直一个人！！？
那就是说如果我入了社，只有我们两个人！？
啊
？！
你？
没事吧？
没，没关系。
这人还真有点奇怪……


不过，
你的名字是？
啊！
嗯。
我是一年级的
江令木绫。
小绫呀！
请多关照！
电子社
好的！

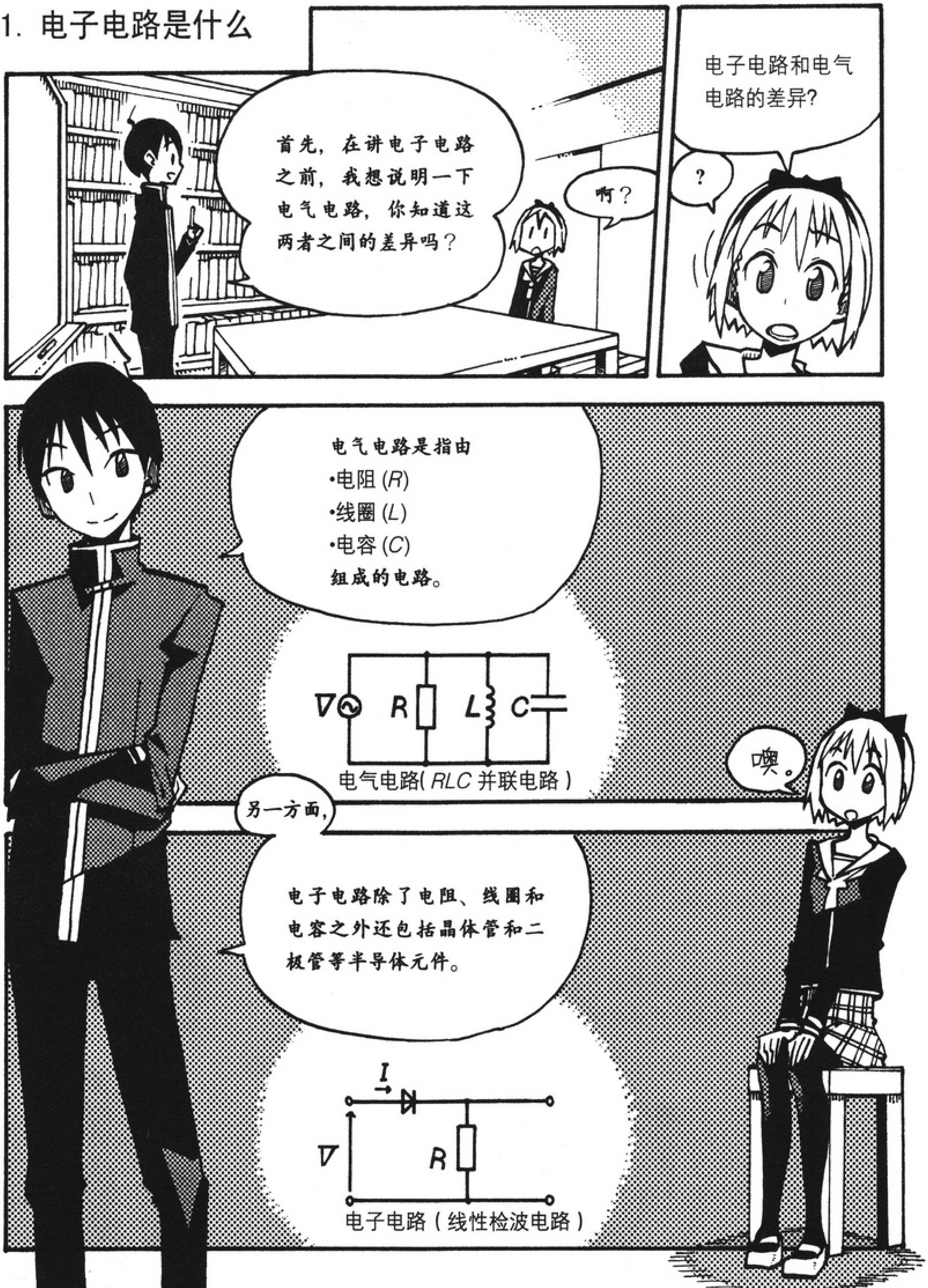
第1章

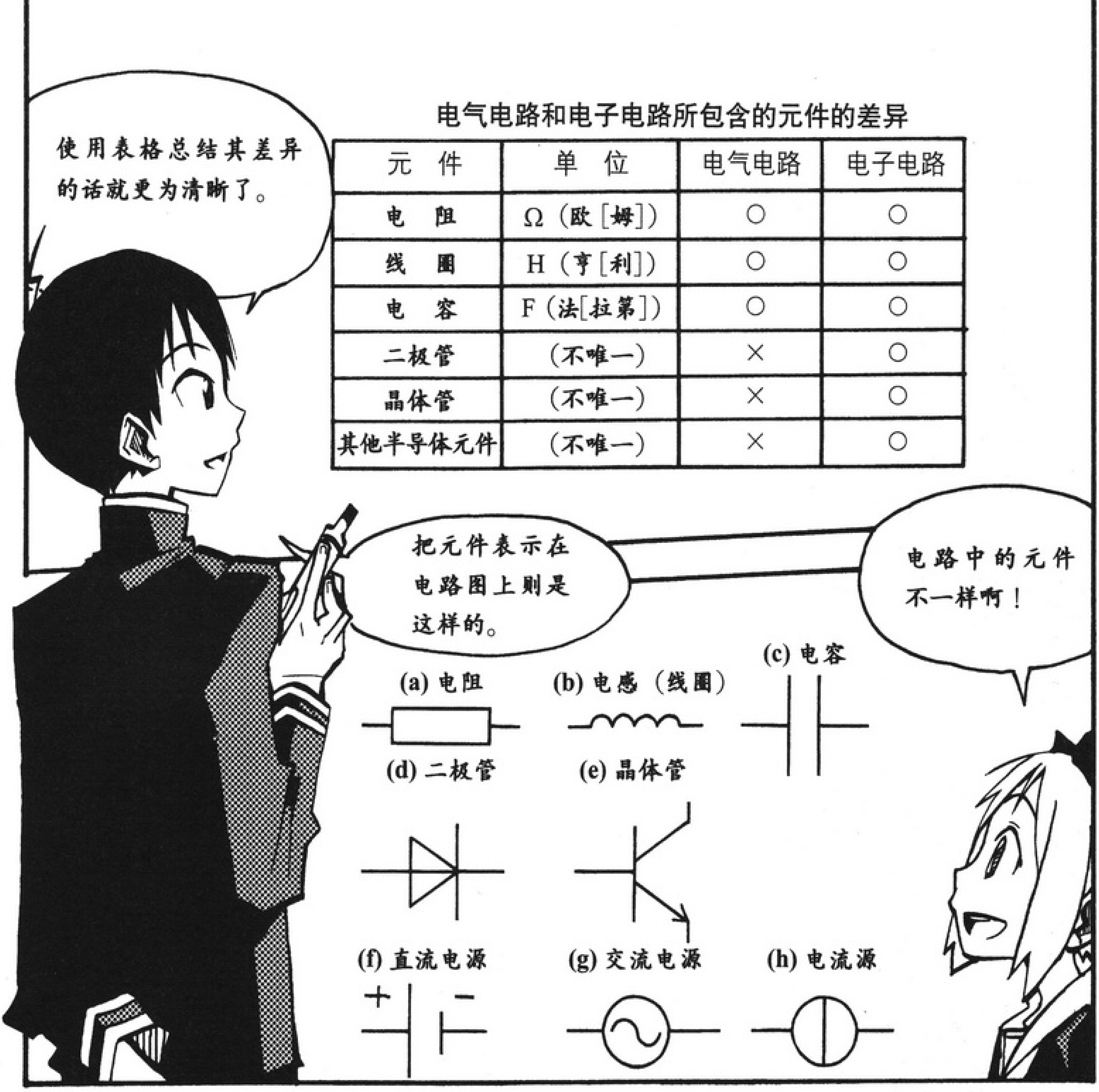
何为电子电路




那么，
你基本上平静下来了吧？
嗯
对不起，
我已经没事了。
那能指导我关于电子电路的知识吗？
现在？
相当急迫啊！
不是，我想听那方面的内容。
打扰你了吗？
哈
怎么可能！
我很高兴教你的。

1. 电子电路是什么


首先，在讲电子电路之前，我想说明一下电气电路，你知道这两者之间的差异吗？
啊？
电子电路和电气电路的差异?
?
电气电路是指由
•电阻 (R)
•线圈 (L)
•电容 (C)
组成的电路。
V
R
L
C
电气电路(RLC 并联电路)
噢。
另一方面，
电子电路除了电阻、线圈和电容之外还包括晶体管和二极管等半导体元件。
I
V
R
电子电路（线性检波电路）



电气电路和电子电路所包含的元件的差异

元　件	单　位	电气电路	电子电路
电　阻	Ω（欧[姆]）	○	○
线　圈	H（亨[利]）	○	○
电　容	F（法[拉第]）	○	○
二极管	（不唯一）	×	○
晶体管	（不唯一）	×	○
其他半导体元件	（不唯一）	×	○



2. 各种电子电路



〈放大电路〉
首先，放大电路是电子电路最基本的，就是将输入信号增大后输出的电路。
增大输入信号？
嗯，将收音机或电视等接收到的声音信号增大，使人的耳朵能够听到。
经常听说的功放……
嗯，与那个是一样的。放大器就是增幅器（Amplifier）的意思。
噢——耶


〈振荡电路〉
下面是振荡电路。
那是指会振荡的电路吗？
嘿，不是那样的。
所谓振荡电路
就是能够在没有任何输入信号的地方产生交流信号，应用在手提电话等方面。
哦！
可以形成正弦波和锯齿形波等周期波！
1.5
1.0
0.5
0
0.5
1.0
1.5
正弦波
1.0
0.5
0
0.5
1.0
1.5
锯齿形波
真是很方便啊！


第3个是
调制电路。
<调制电路>
向电视和收音机输送声音信号时，必须使用高频电路输送信号。
调制电路是可调制振动大小或频率的电路。
哦！
是那样啊？
附带说一下，
振幅的调制为AM，频率的调制为FM，
这样比较容易记吧。
是说收音机吧，那样的话，我明白。
FM
AM 530



〈检波电路〉
第4个是检波电路。它是从电视或收音机接收到的信号中提取声音等的。
……
……
因为是恢复其原状，所以是检波。
是的。
〈滤波器〉
收听想听的广播节目时，怎样收听？
接下来是滤波器。
举例来说关于滤波器是什么的话……
嗯，嗯。
……
我现在只感觉到耳朵的存在。
首先，先戴上耳机，隔绝与外界的接触。
因而才可以说做好了将精神完全投入到广播世界的准备。



我认为那是非常有意义的收听方法。
啊!
我想是首先打开开关，然后选择频道。
啊
那样，只提取想听的节目的频率信号就是滤波器。
80
原来如此。
冲咖啡的时候就是用过滤器来去除豆渣的。
滤波器就是跟那一样的东西。
啊——
好想喝……
好想喝……


〈运算放大器〉
接着是第6个，
运算放大器。
这个叫做 操作电灯。
电灯？
与放大电路不同吗？
运算放大器是集成电路的一种，
作为放大电路具有很高的性能。
是的。
运算放大器作为一种放大电路来使用，其输入一侧和输出一侧可以做到互不影响。
利用此点，可以做出微分电路、积分电路、振荡电路。
微分……
积分……
同心协力就可以做很多事情啊。
就是如此。


<逻辑电路>
第7个是逻辑电路。
所谓逻辑电路是……
不行!!!
啊
呃
你突然怎么了？
啊
啊
啊
实际上，我最头疼的就是逻辑或逻辑学。
没问题!
虽说是逻辑，并不是那么复杂的。其特点主要有3个。
3个?
哈



1. 计算加法的电路
2. 计算乘法的电路
3. 记忆数字和文字的电路
逻辑电路的特点主要就只是这些。
只有这些吗？
嗯，很简单吧？
其实，电脑中密密麻麻地进行工作着的正是逻辑电路。
哇！
啊，是那样啊。
嘣
嘣
啊
啊
啊



<电源电路>
最后是
电源电路。
我想这个你是
明白的。
那是什么呀？
身边的东西如
AC接头。
接头！
是机器的电源？
是的，它可从电源电路插座中提
取出交流电，然后转换成直流电。
哇！


为了将交流电转换成直流电，通过能去掉负电压成分的整流电路后，在平滑电路上使电波平稳。
必须输出一定的直流电压。
整流
(a) 交流电
(b) 直流电


啊！


要在AC接头进行这样的操作。

3. 以收音机为例



想一想将之前说明的内容适当用到收音机看看吧。
收音机可将接收到的想听的频道的信号以声音的方式播放出来。
是的。
如果用简单的结构来说明的话，
就是这样的。
①接收天线
②
调谐放大电路
③
检波电路
④
低频放大电路
⑤扩音器


我们对每一个部分来做一个具体的说明吧。
① 用接收天线接收电波
② 只选择想接收的频率，并只放大此部分（调谐放大电路）
③ 从调谐放大电路接收到的信号中提取声音信号，用检波电路进行操作
检波电路
信号
④ 放大提取的声音信号使人的耳朵可以听到（低频放大电路）
⑤ 将放大的信号用扩音器发出声音
这就是收音机的结构。


就是这样的，你明白了吗？
是的，
差不多。
怎么样？这样的内容无聊吗？
不！怎么会！
我非常……非常愉快！
哦。
是吗？
所以，我明天也要来。
啪
啊？
啊


明天……
我还可以来吗?
当然，你已经是电子社的一员了。
啪
啪
!?
以……
你没事吧?
以后请多多关照啊!
呵
呵

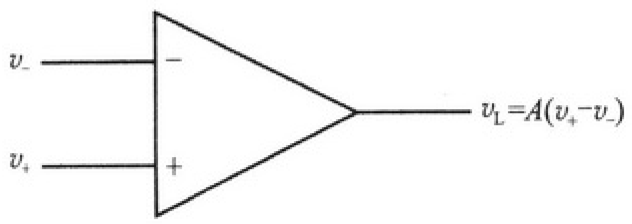
补充知识

运算放大器——最终的放大电路

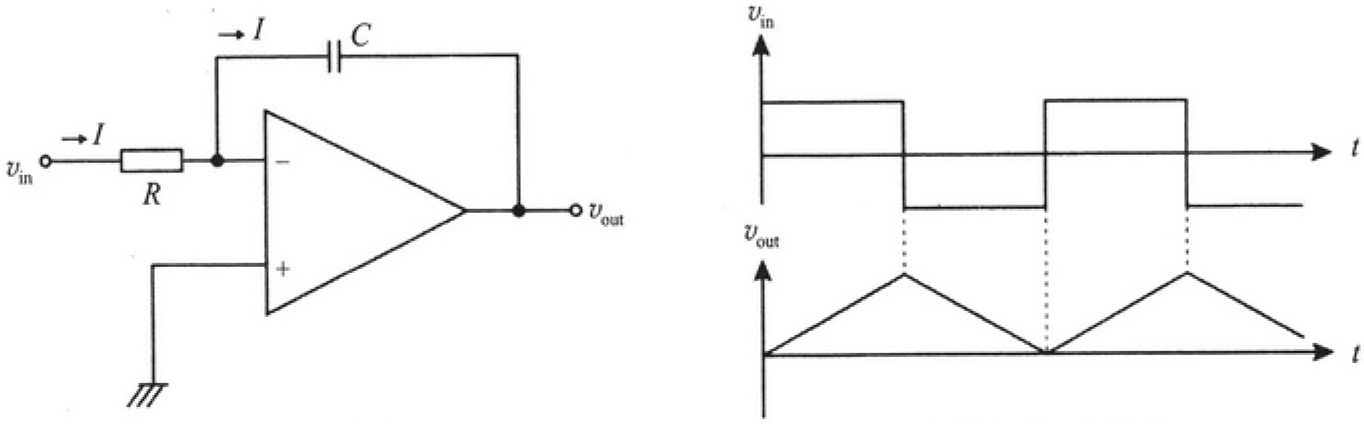
图 1.A1 表示运算放大器。运算放大器的特征可概括如下：

1．放大率非常高（$A \geqslant 2\times10^5$）。
2．假设接地是成立的（将 v_+ 的电极接地，v_+ 与 v_- 的电位差可以看作为 0）。
3．低输出电阻（上述 2 成立的前提条件）。

利用这 3 个性质可制成各种各样的电路。例如，图 1.A2 所示，通过连接 R 与 C 可组成积分电路。也就是说，具有这样的特性：输出电压与输入电压的积分值成比例关系。而且，将图 1.A2 的积分电路中的 R 与 C 互换的话，则变为微分电路。

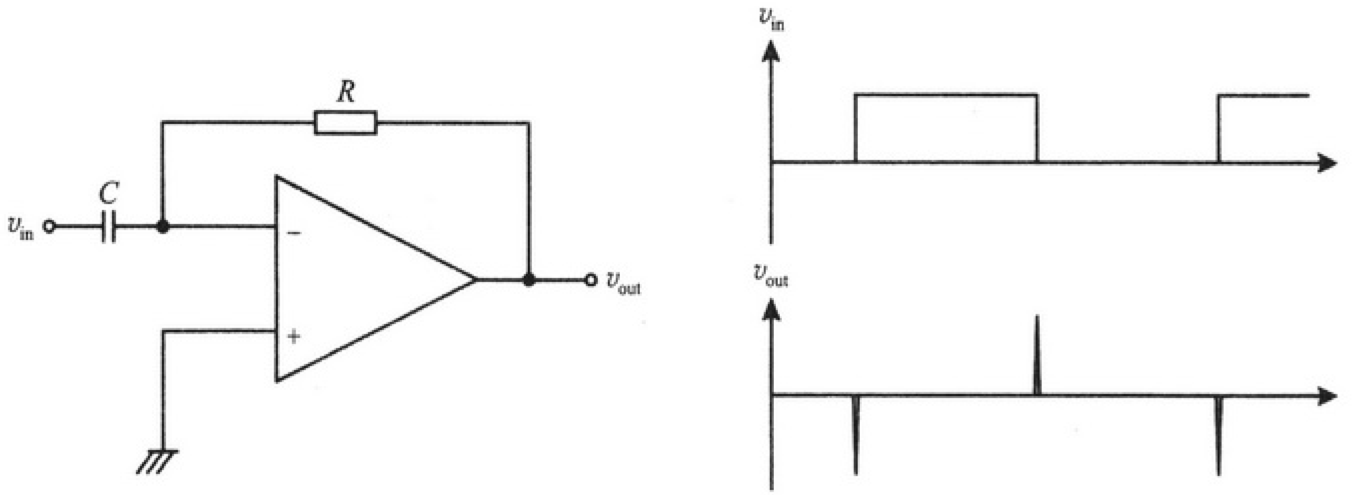


●图1.A1　运算放大器的构成图



（a）积分电路　　　　（b）输入输出的波形

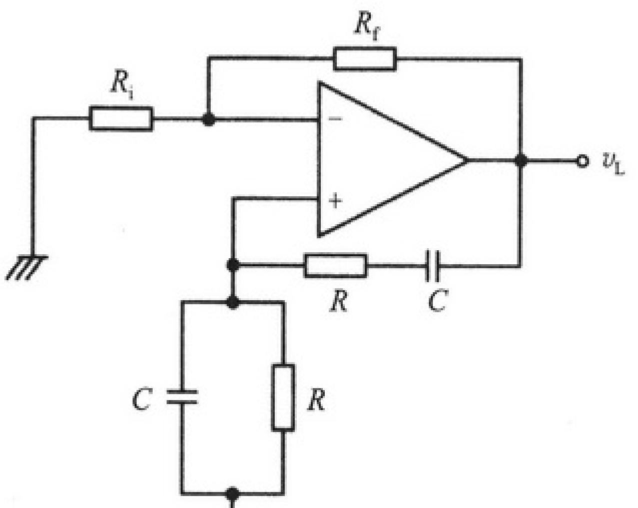
●图1.A2　积分电路



（a）微分电路　　　　（b）输入输出的波形

●图1.A3　微分电路

同时，图 1.A4 表示的是韦氏电桥振荡器。它虽只是输出电压对输入电压的反馈，但实际的输出为正弦交流电。据说工科高等院校实验室里的交流振荡器大多都是这样的电路。

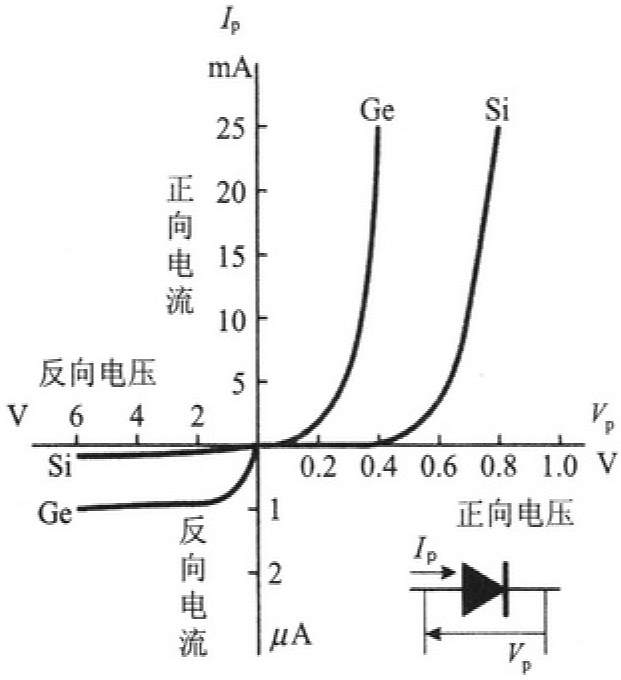


●图1.A4　韦氏电桥振荡器

这样，利用运算放大器可以形成各种各样的电路。

逻辑电路

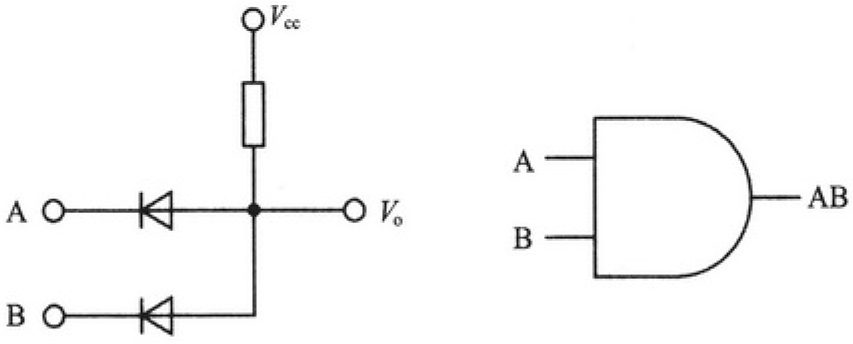
如前面所述，所谓的逻辑电路就是计算机中表示 0 与 1 的电路。在这里，所谓 0 是指 0V(伏［特］) 的低电压，1 是指 5V(伏［特］) 的高电压，将这两种电压作为信号来处理（这称为正逻辑）。因此，由逻辑电路构成的电路有时被叫做数字电路。



●图1. A5　二极管

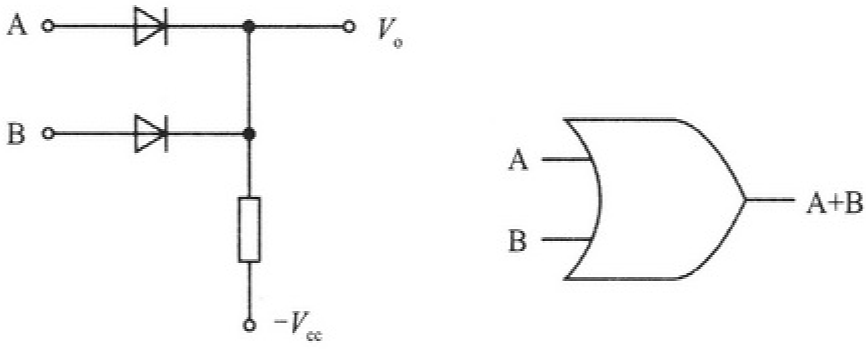
图 1. A5 表示的是二极管。二极管具有电流只在三角符号的方向流动，不在其相反方向流动的特性。利用此特性，可以形成进行或门（OR）及与门 (AND) 的电路。

图 1. A6 显示的是逻辑与门（AND）电路。A 与 B 同为 1 时，输出 V_o 则为 1。也就是说，A 与 B 同为 1 时，二极管内因正向电压不发挥作用而不导电，V_{cc} 的电压就是原有的 V_o。如果某一个输入电压为 0 时，二极管内会导通，二极管两端的电压会变小，V_o 会变为 0。



（a）电路构成　　（b）符号

●图1. A6　AND电路

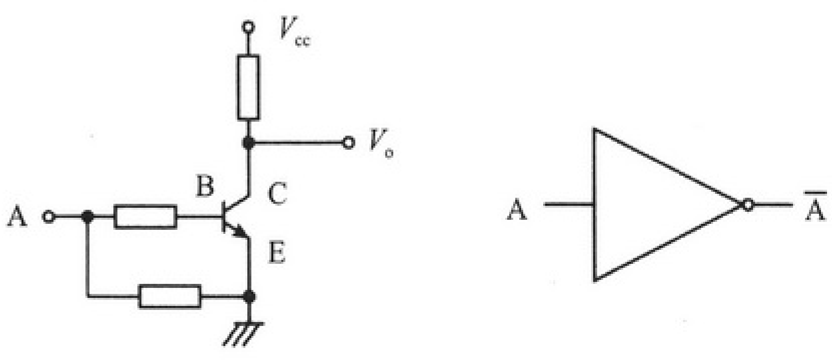


（a）电路构成　　（b）符号

●图1.A7　OR电路

图 1. A7 是逻辑或门（OR）电路。这种电路中，输入电压的某一方是 1 的情况时，输出电压则为 1，输入电压全都为 0 时，输出电压也变为 0。输入电压全都为 1 时，二极管导通，V_o 会变为 1。输入电压任何一个为 1 时，在输入电压为 0 的地方，二极管会导通，V_o 会变为 0，但是，在输入电压为 0 的地方，二极管则不会导通。而且，输入电压双方都为 0 的情况时，电流通过二极管向 $-V_{cc}$ 导通，所以输出电压变为 0。

图 1. A8 是非门（NOT）电路。输入电压为 0 时，输出电压则是 1，输入电压为 1 时，输出电压则为 0。这种情况下，因为二极管与电阻不能组合，使用晶体管来代替二极管。向 A 输入电压 1 时，晶体管的基极和发射极之间流着正向电流，因此从 V_{cc} 出发，经由集电极向发射极流入电流。这时，集电极和发射极之间的电压为 0，所以 V_o 则变为 0。与此相反，向 A 输入电压 0 时，晶体管的基极和发射极之间不是流着正向电流，所以不能从 V_{cc} 出发经由集电极向发射极流入电流。因此，V_{cc} 的电压就那样被传递到 V_o，因此向 A 输入电压 0 时，V_o 则为 1。



（a）电路构成　　（b）符号

●图1.A8　NOT电路

第2章

晶体管的结构



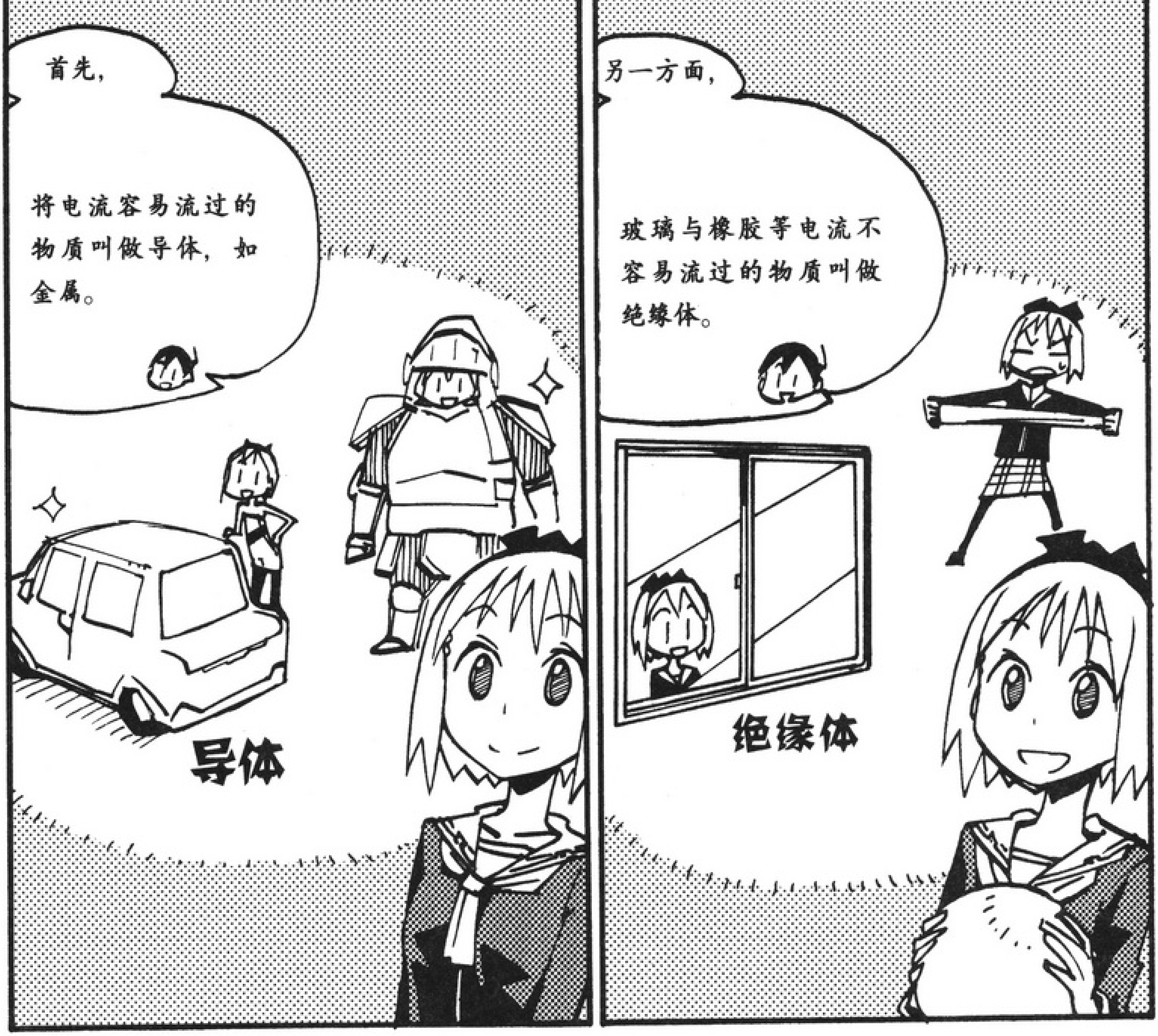

铃铃铃……
2-A
好啦。
哇啊！
你好！
那么，社团活动……
小绫，你怎么了？
一生……不对……
一起……
？

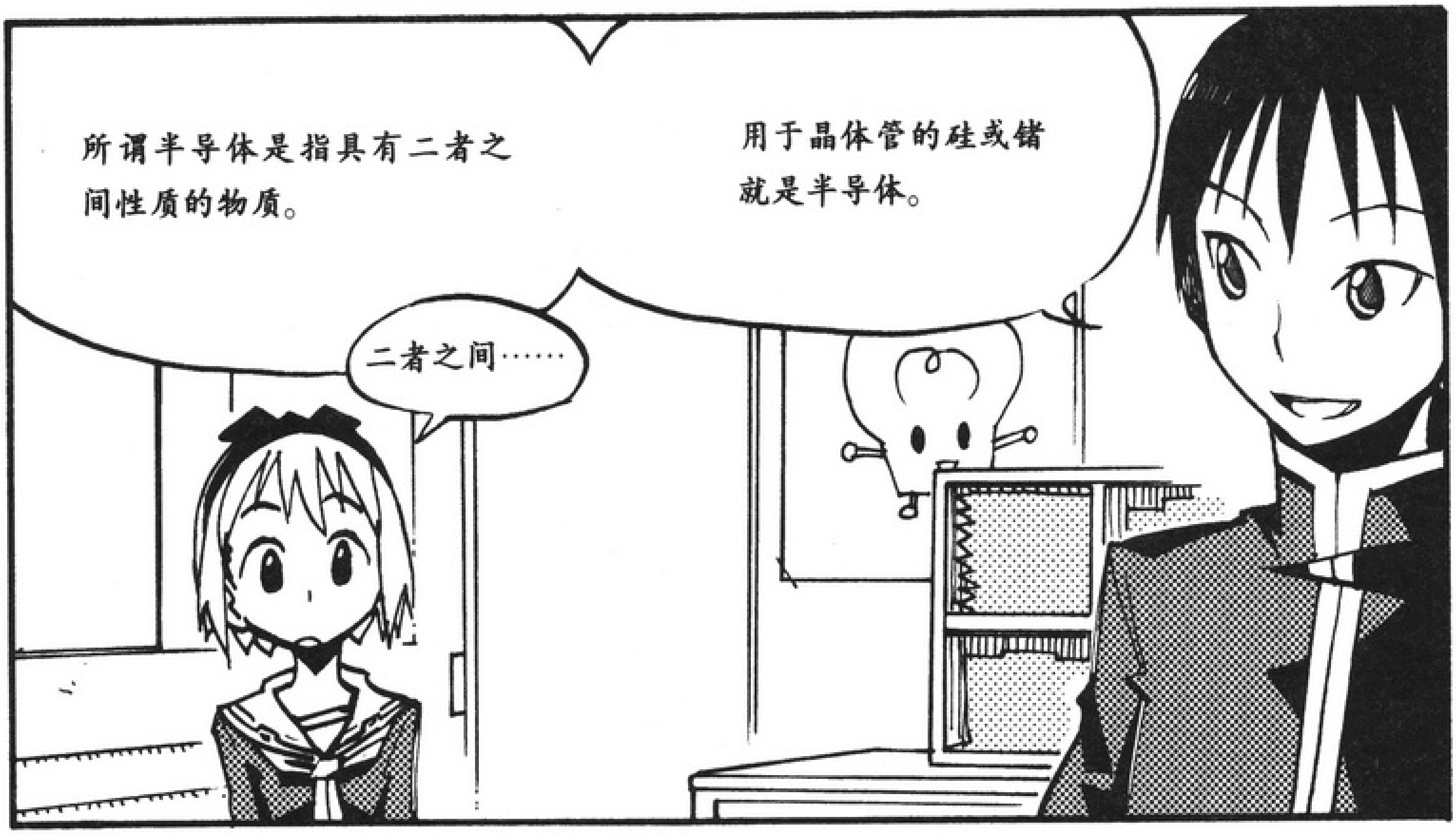


我可以跟你一起去活动室吗?
可以啊，不过你的声音怎么了？
！
太棒了!!!
小凌
学长，我们走吧！！
小绫，电子社可是在这边呀。

1. 何为半导体

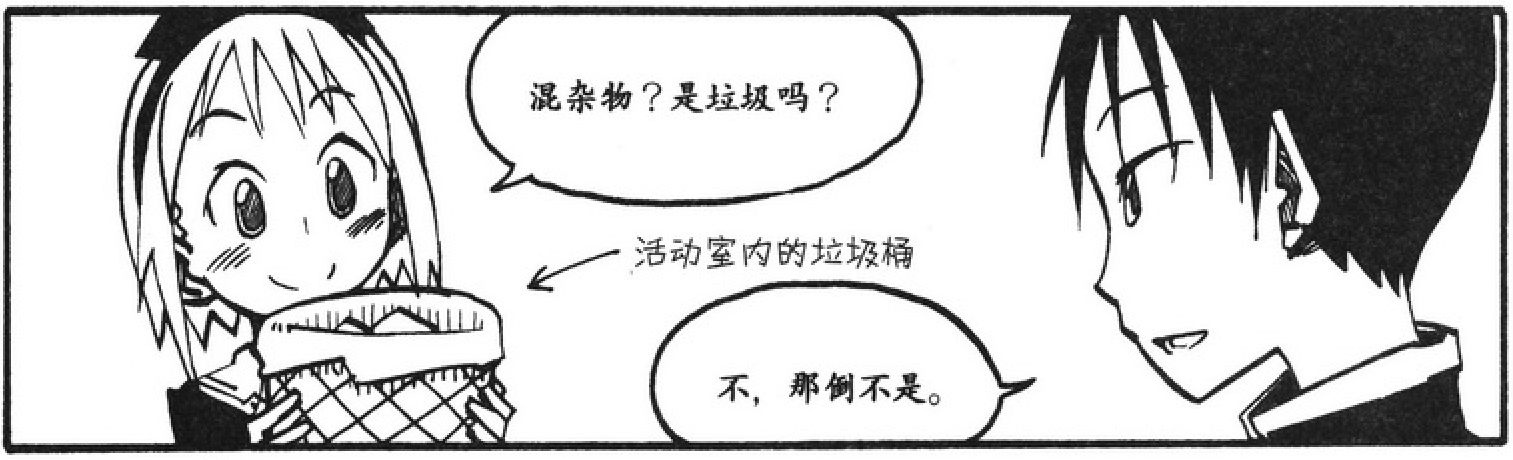

今天我们来学习
晶体管知识吧。
好的。
但首先有必要学习一下半导体的知识。
对于半导体，你知道些什么吗？
嗯……
我不太知道。
所谓半导体是指，
常温下导电性能介于导体与绝缘体之间的材料。
导体？
绝缘体？


首先，
将电流容易流过的物质叫做导体，如金属。
导体
另一方面，
玻璃与橡胶等电流不容易流过的物质叫做绝缘体。
绝缘体


所谓半导体是指具有二者之间性质的物质。
用于晶体管的硅或锗就是半导体。
二者之间……



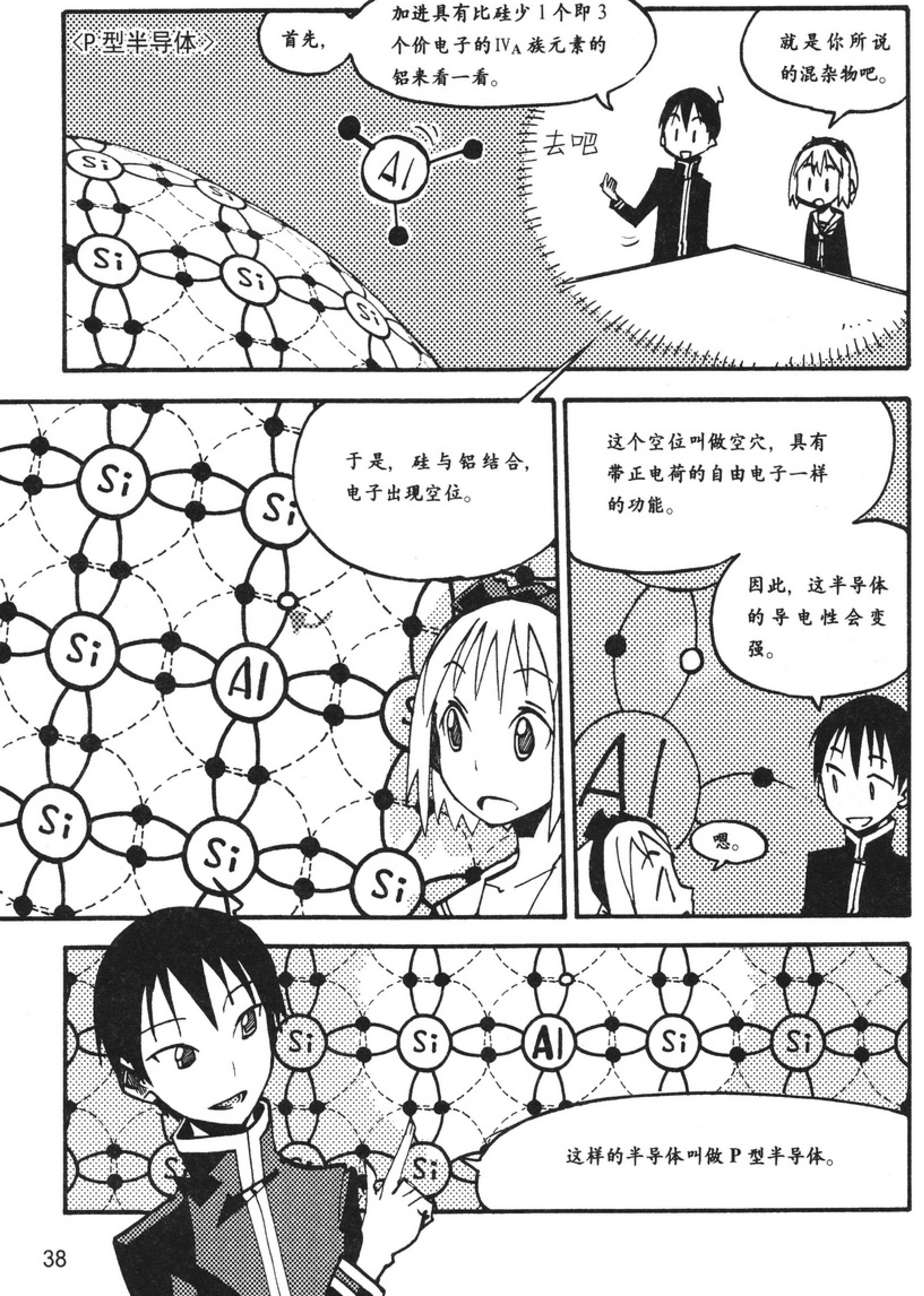
《硅的共价键》
硅是周期元素表中的IVA族元素，在最外层上具有4个价电子。
Si
而且，每个原子都互相发出4个价电子从而形成共价键的结晶。
用人来打比方的话，就是互相之间紧紧拉着手的状态。
那样的状态，你能明白吗？
嗯
嗯
在这样密集地状态下，可自由活动的电子——自由电子会变得非常少，所以很难通电。
因此，
掺入混杂物才会变得容易通电。
……



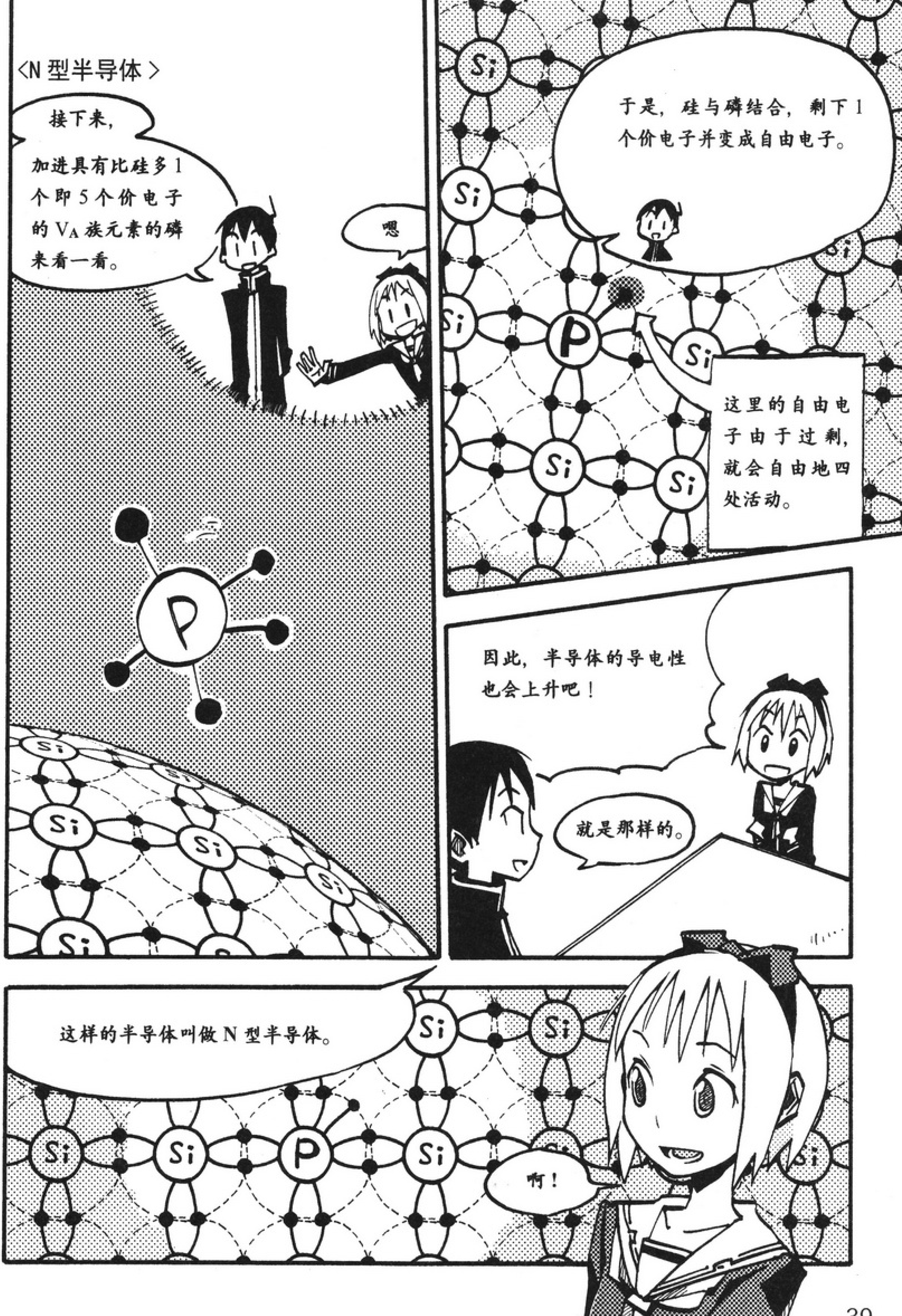


周期	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIII	VIII	VIII	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	0
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 元素	113 元素					

镧系元素	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
锕系元素	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



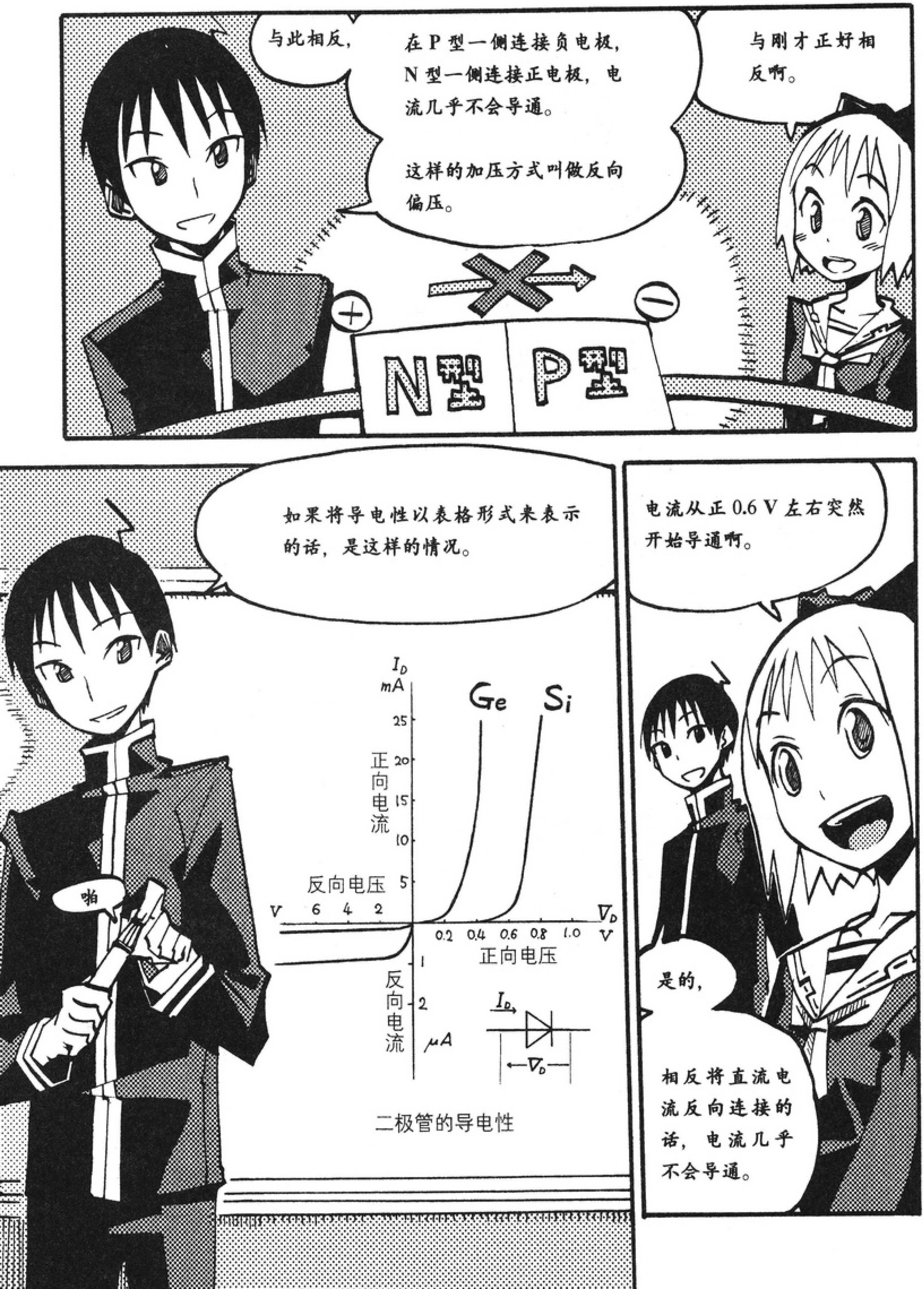
<P 型半导体>
首先，
加进具有比硅少 1 个即 3 个价电子的ⅣA 族元素的铝来看一看。
就是你所说的混杂物吧。
去吧
Al
Si
于是，硅与铝结合，电子出现空位。
这个空位叫做空穴，具有带正电荷的自由电子一样的功能。
因此，这半导体的导电性会变强。
嗯。
这样的半导体叫做 P 型半导体。


〈N型半导体〉
接下来，
加进具有比硅多1个即5个价电子的V_A族元素的磷来看一看。
嗯
于是，硅与磷结合，剩下1个价电子并变成自由电子。
这里的自由电子由于过剩，就会自由地四处活动。
因此，半导体的导电性也会上升吧！
就是那样的。
这样的半导体叫做N型半导体。
啊！

2. PN结二极管


P型
N型
将P型半导体与N型半导体组合一起就会做出二极管和晶体管的半导体元件。
这叫做PN结。
那就是说，如果学长是P型，我是N型的话……
结合
啊？
不，不对，我实际是M，决不是S。
呜呜
你在说些什么呀？那是P与N。
啊？

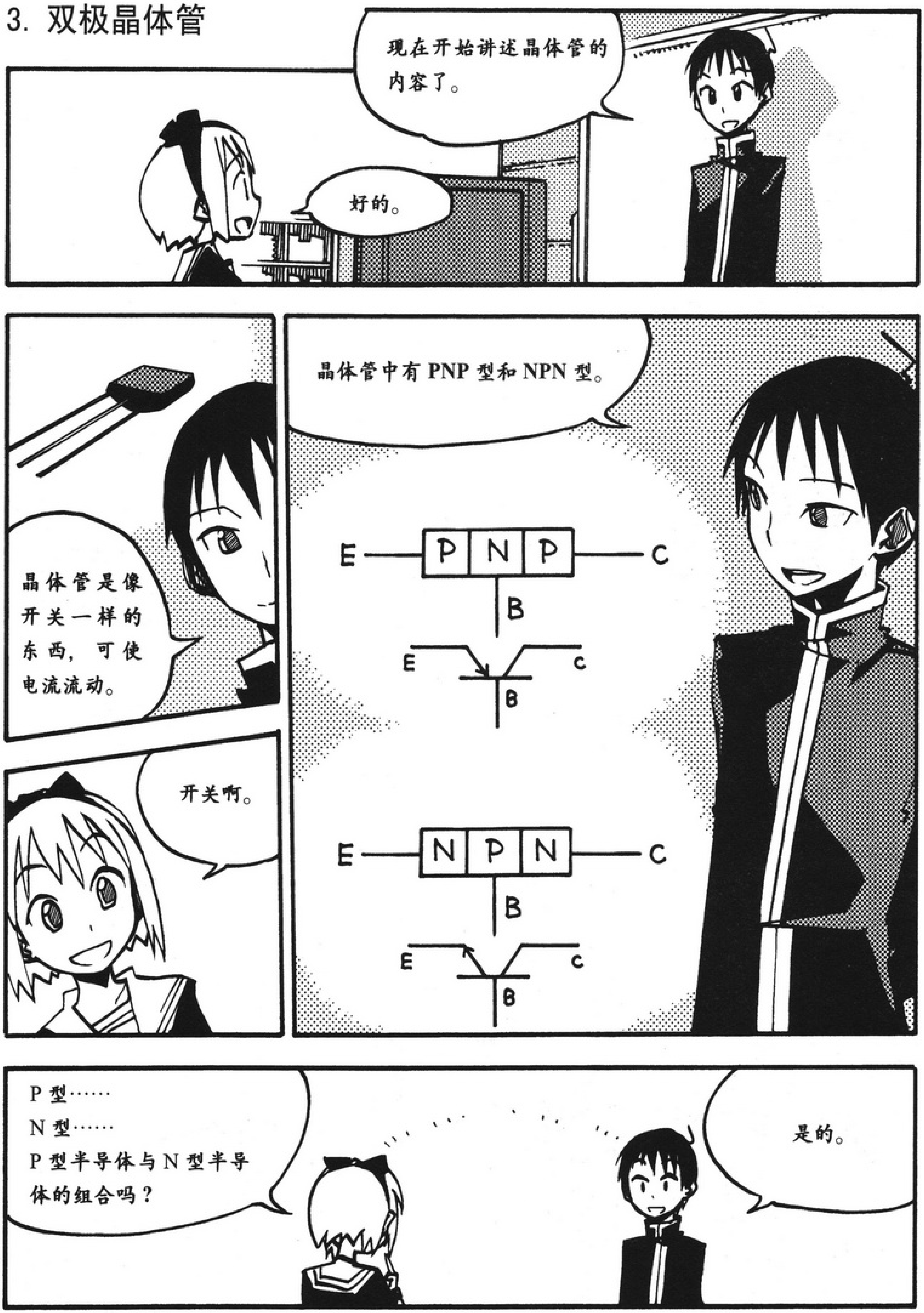

〈偏　压〉
那二极管有什么特征啊？
嗯。
吓死我了。
二极管具有电流只流向单一方向的性质，叫做整流作用。
整流作用！
在二极管P型一侧连接正电极，N型一侧连接负电极，电流就会导通。
电流
P型
N型
这样的加压方式叫做正向偏压。
是的。


与此相反，
在P型一侧连接负电极，N型一侧连接正电极，电流几乎不会导通。
这样的加压方式叫做反向偏压。
与刚才正好相反啊。
N型
P型
如果将导电性以表格形式来表示的话，是这样的情况。
啪
I_D mA
Ge
Si
25
20
15
10
5
正向电流
反向电压
V 6 4 2
V_D
0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 V
正向电压
1
2
反向电流
μA
I_D
V_D
二极管的导电性
电流从正0.6 V左右突然开始导通啊。
是的，
相反将直流电流反向连接的话，电流几乎不会导通。



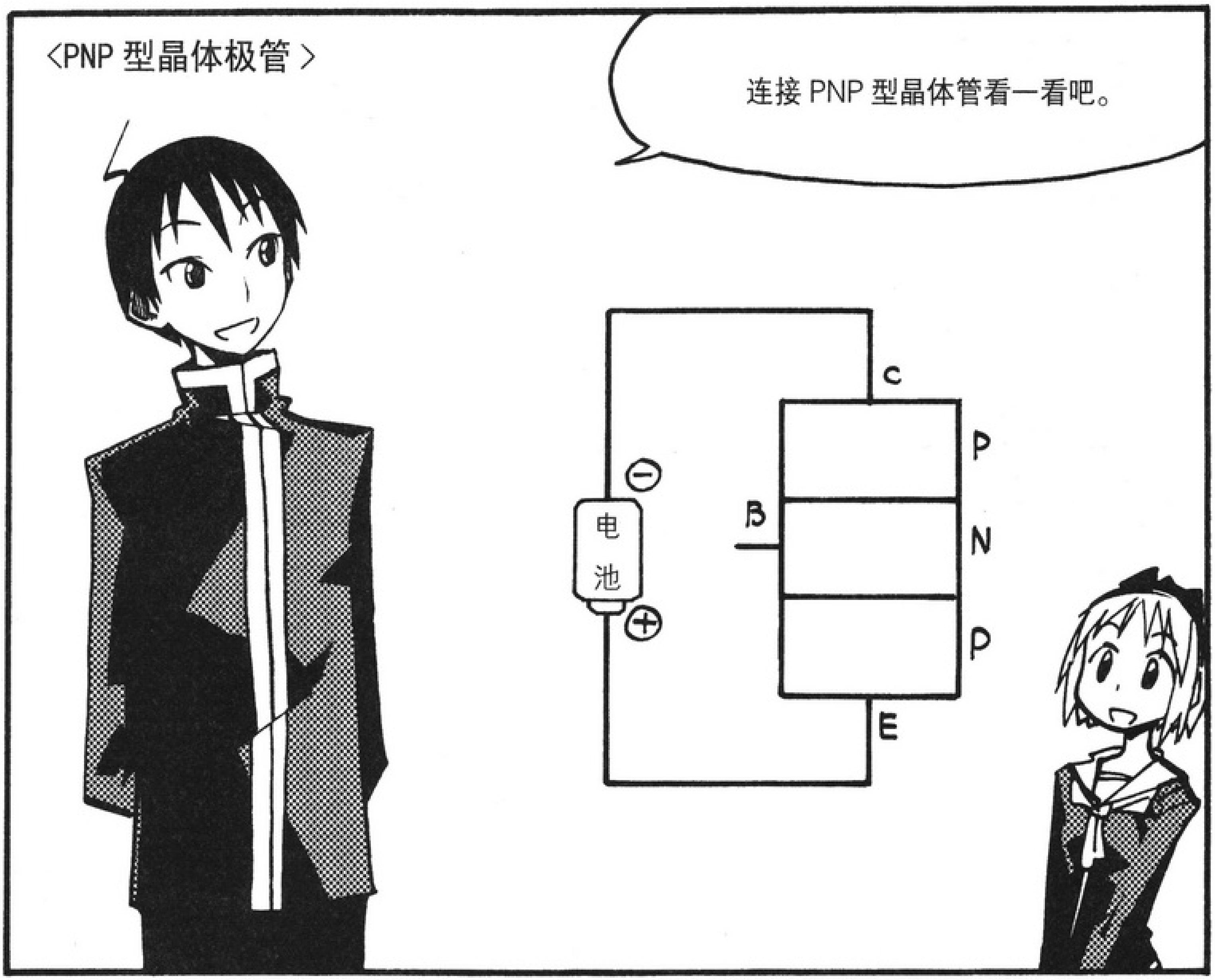
<整流电路>
利用这种性质，可以制作出电流只向一个方向流动的整流电路。
就是将交流电转变成直流电吧。
+
t
V_1 0
-
交流电
i
+
V_1
-
R
+
t
i 0
-
直流电
顺便说一下，
P 型半导体与 N 型半导体中 P 与 N 的含义，你明白吗？
那是什么啊？
P 是 positive,
N 是 negative
的意思。
耶
就是正极与负极吧！
……
好厉害！

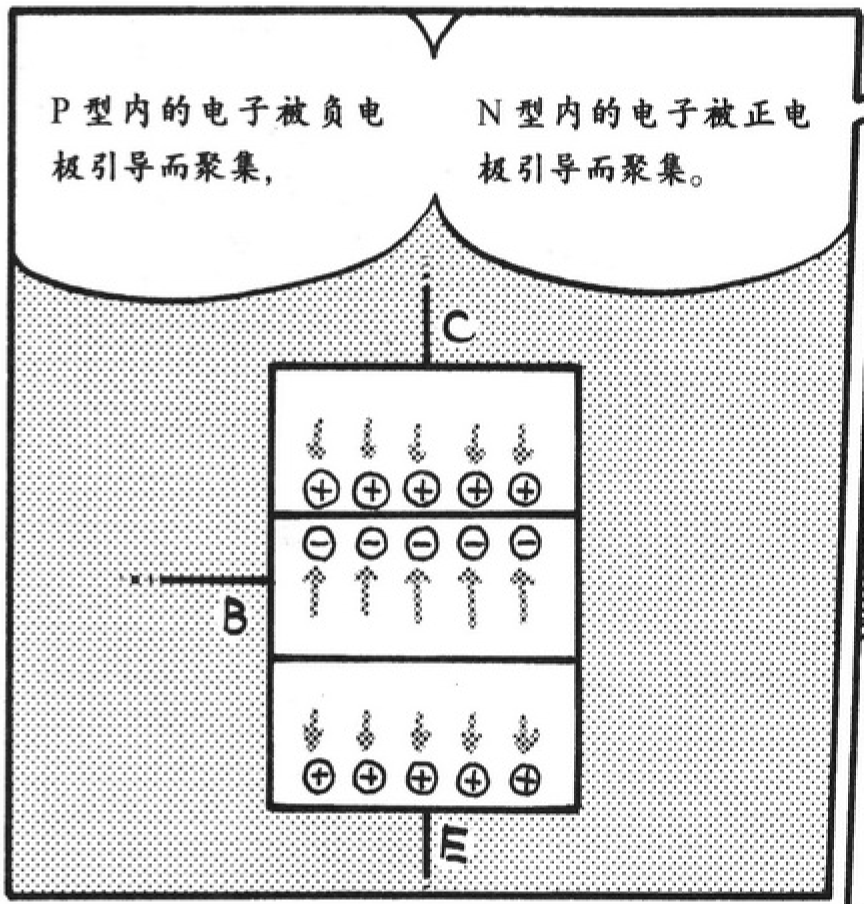
3. 双极晶体管


现在开始讲述晶体管的内容了。
好的。
晶体管是像开关一样的东西，可使电流流动。
晶体管中有 PNP 型和 NPN 型。
E P N P C
B
E C B
E N P N C
B
E C B
开关啊。
P 型……
N 型……
P 型半导体与 N 型半导体的组合吗？
是的。

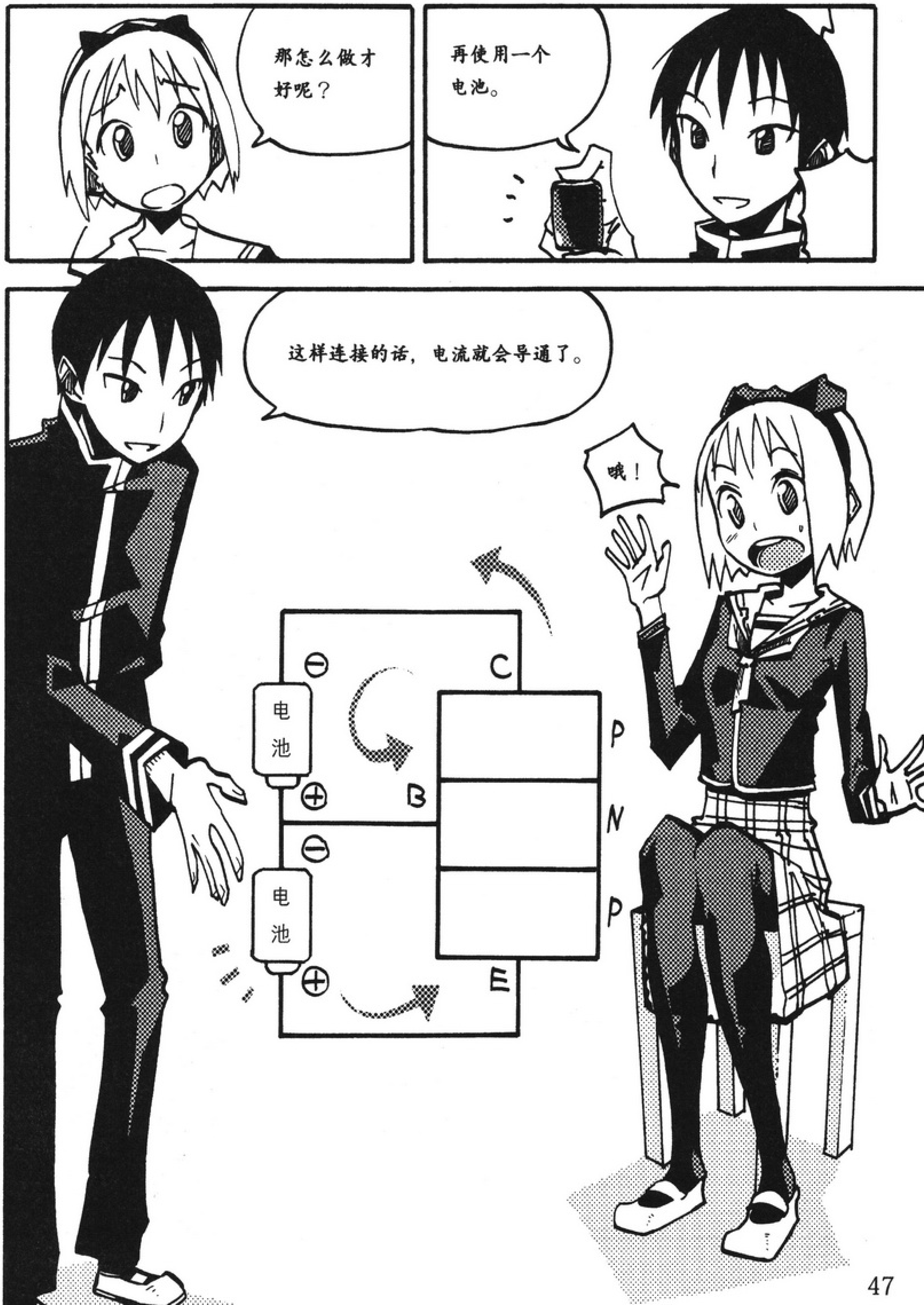


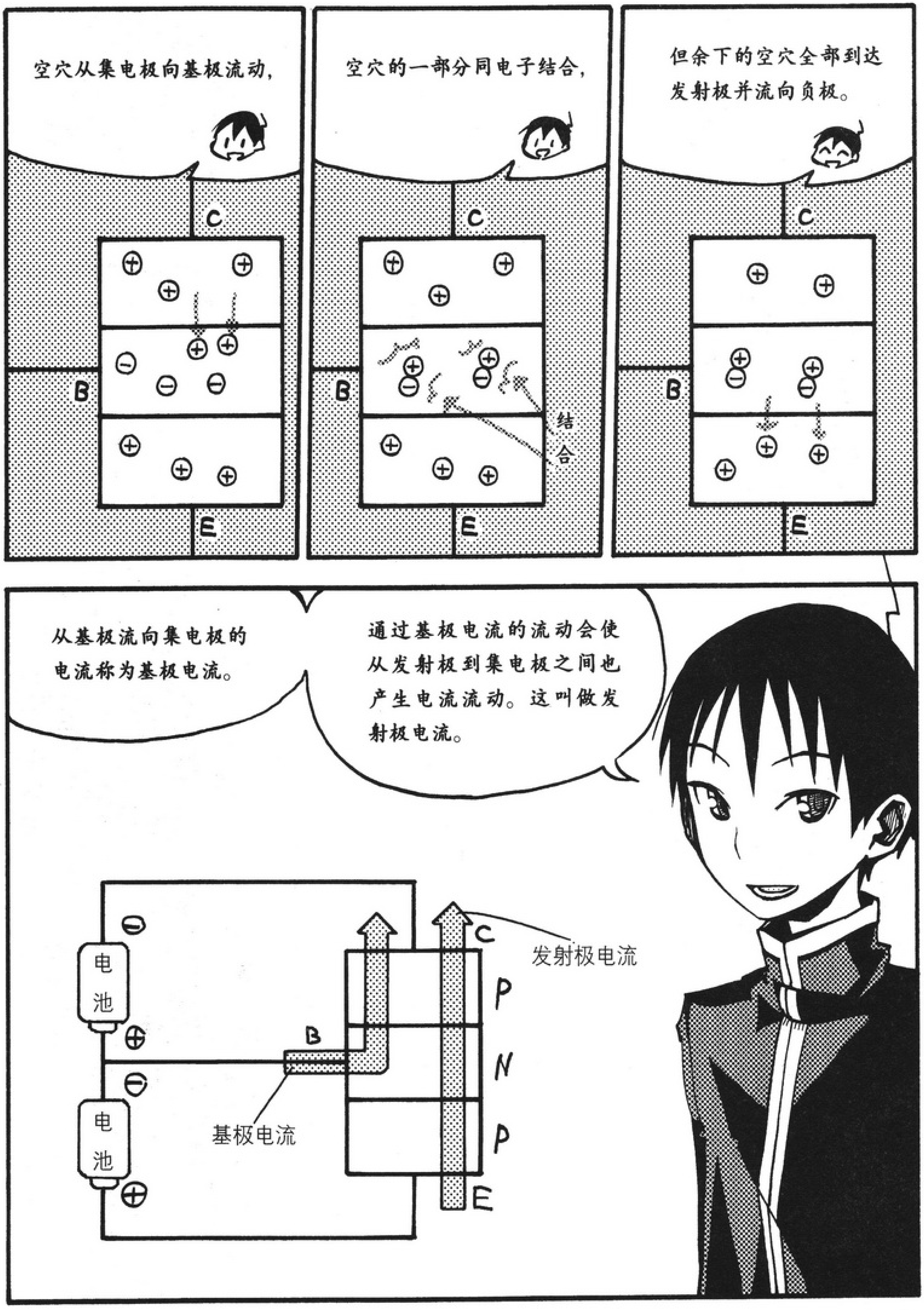
同时，
晶体管具有3个端子，
E(发射极)
B(基极)
C(集电极)
E
C
B
是的。
为了使晶体管正常工作，必须满足两个条件。
在发射极与基极之间加正向偏压
在基极与集电极之间加反向偏压
C
P
N
P
B
正向偏压
电池
E
C
P
N
P
B
反向偏压
电池
E
?
?
接下来，我来说明一下它们的结构吧。

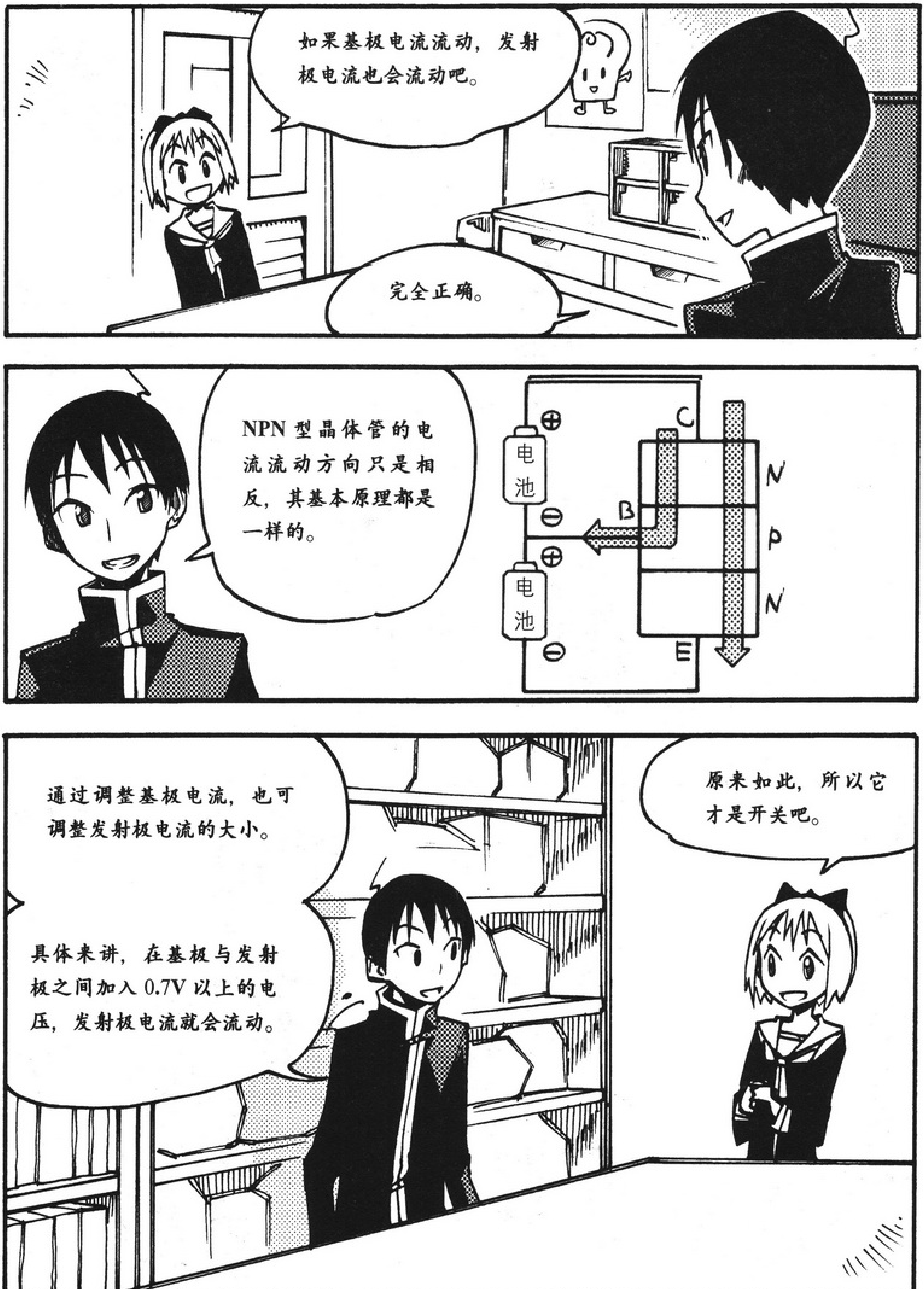

<PNP 型晶体极管>
连接 PNP 型晶体管看一看吧。
C
P
B
N
P
E
电
池


P 型内的电子被负电极引导而聚集，
N 型内的电子被正电极引导而聚集。
C
B
E

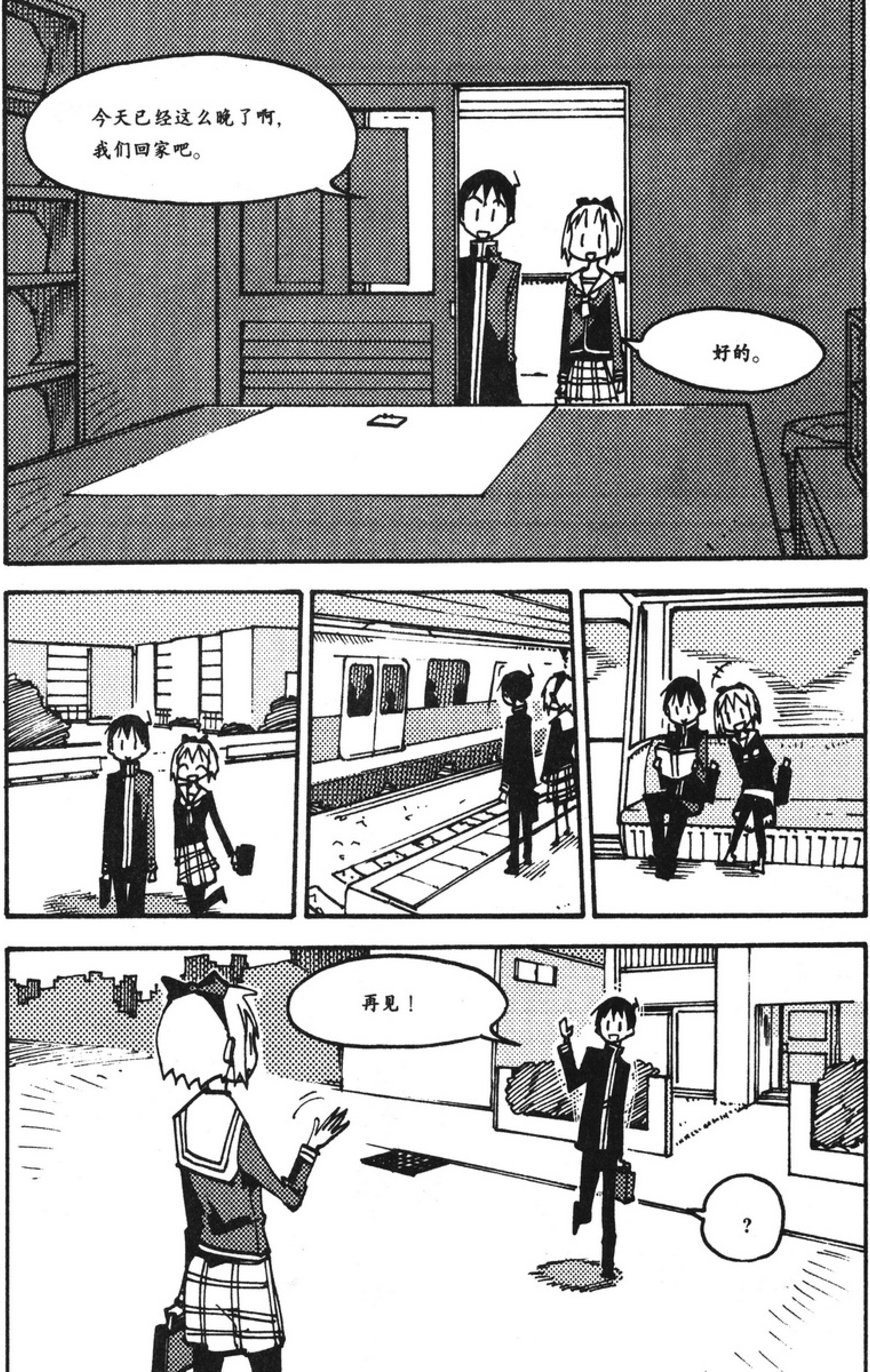

但是，如果只是这样的话，
在基极与集电极之间就会形成没有电子和空穴的状态。
电流不会导通。


那怎么做才好呢？
再使用一个电池。
这样连接的话，电流就会导通了。
哦！
C
电池
B
电池
E
P
N
P


空穴从集电极向基极流动，
C
B
E
空穴的一部分同电子结合，
C
B
结合
E
但余下的空穴全部到达发射极并流向负极。
C
B
E
从基极流向集电极的电流称为基极电流。
通过基极电流的流动会使从发射极到集电极之间也产生电流流动。这叫做发射极电流。
电池
电池
C
发射极电流
P
B
N
基极电流
P
E


如果基极电流流动，发射极电流也会流动吧。
完全正确。
NPN型晶体管的电流流动方向只是相反，其基本原理都是一样的。
电池
电池
C
B
E
N
P
N
通过调整基极电流，也可调整发射极电流的大小。
具体来讲，在基极与发射极之间加入0.7V以上的电压，发射极电流就会流动。
原来如此，所以它才是开关吧。


到此，半导体元件的基本内容就结束了，你没问题吧？
是的，没问题。
那我们实际来操作一下看吧。
收音机！
噢！
啊！
好的！


今天已经这么晚了啊，
我们回家吧。
好的。
再见！
？



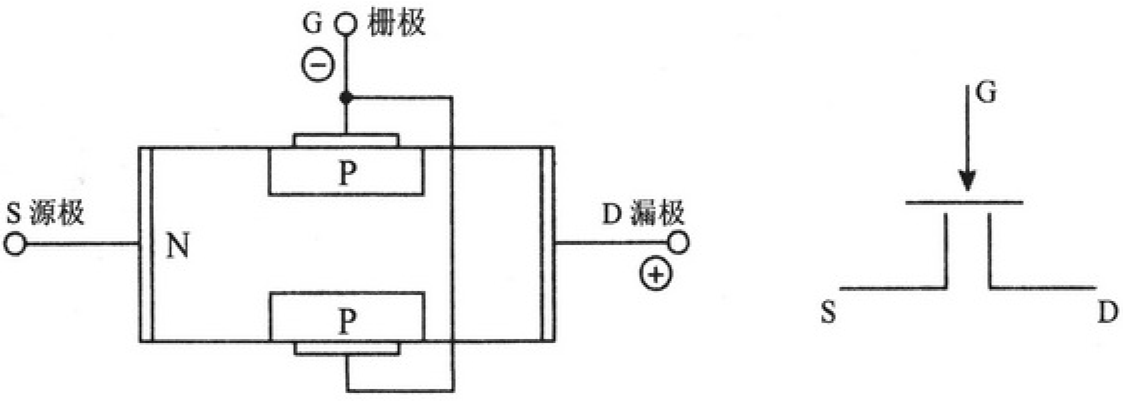
唉？
你家是在这附近吗？
不是的。
离这里有两个小时的路程。
那不是相当远吗？
你为什么要往这边走？
因为……
回家路上，两个人比一个人不是更愉快嘛！
也许是那样……
那接下来你怎么办？
唉？
那我可以去你家拜访吗？
不行！
不是说了不行嘛！
天黑的话会比较危险，你必须回家去。
……


学长，
你是在担心
我吗？
啊，是啊！
你真体贴！
♥ ♥ ♥
拜拜
我不想让学长为我担心，
那我回家了，再见！
这个人，怎么回事……

补充知识

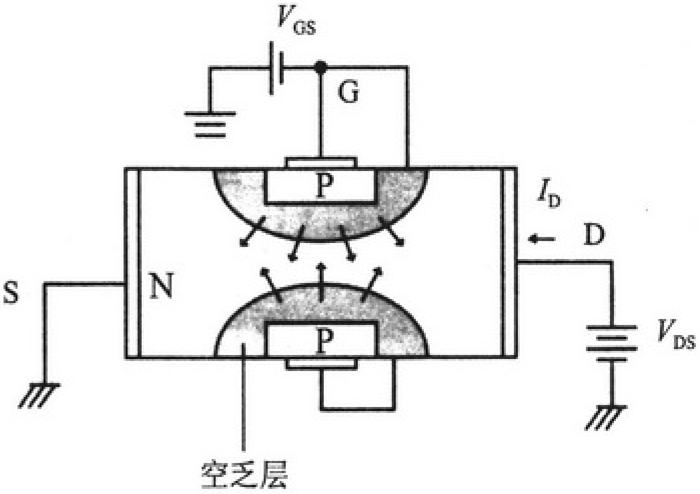
J-FET 的结构与原理

所谓 J-FET 是指结型场效应晶体管（Junction Field Effect Transistor）。其结构图如 2.A1 所示。这样，从具有源极 (S) 和漏极 (D) 的 N 型半导体开始会形成一个薄层，这个薄层叫做 N 沟道。同时，将其连接两个 P 型半导体后结成电极，这个电极称为栅极（G）。



（a）基本结构　　（b）图的符号

●图2.A1　J–FET的结构图



●图2.A2　J–FET的原理图

J-FET 的原理图如图 2. A2 所示。首先，在栅极与源极之间加反向偏压 V_{GS}（使之工作的直流电压）。通过此操作，栅极的 P 型半导体与 N 沟道之间形成空乏层。从漏极到源极流动的电流即漏极电流 I_D 会穿过 N 沟道的一部分。

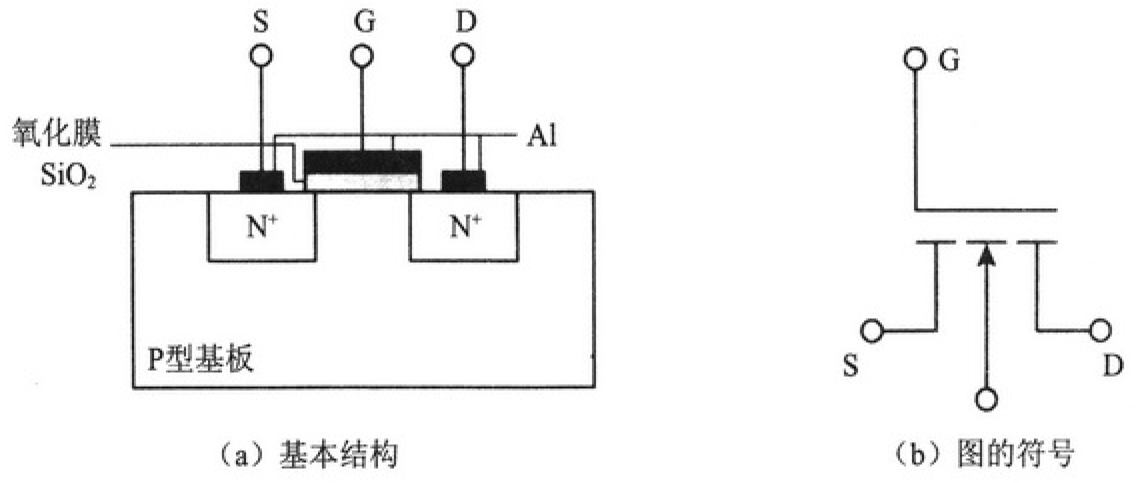
可是，V_{DS} 保持固定的情况下，V_{GS} 越大，空乏层则也会扩大。如果空乏层扩大到阻塞 N 沟道时，漏极电流 I_D 则不会流出。

如 $I_D=0$ 时，V_{GS} 叫做夹断电压，V_{GS} 则在夹断电压以下的大小范围内适用。

此 J-FET 具有电流几乎不会从栅极流出，并且可以通过栅极电压控制漏极电流的性质。

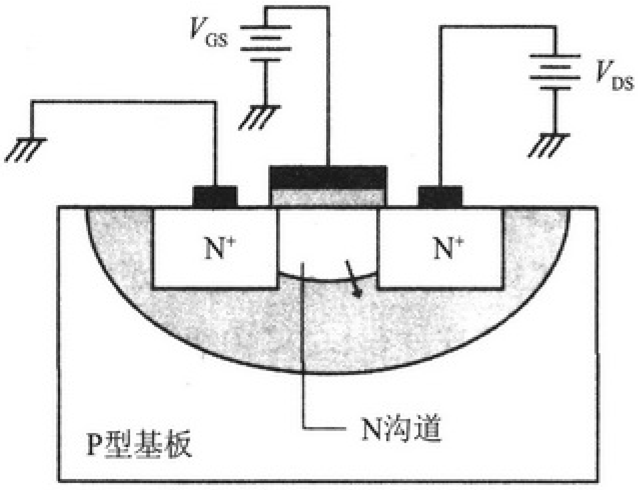
MOS-FET

所谓 MOS-FET 的 MOS 是指金属（Metal）、氧化物（Oxide）、半导体 (Semiconductor) 的略称。MOS-FET 由 3 个层次构成。其结构图如图 2.A3 所示。



● 图2.A3　MOS-FET的结构图

这样，有 P 型基板，在 N 型半导体中通过掺杂而构成源极和漏极，记为 N^+。同时，栅极则形成电极与 P 型基板之间夹着氧化膜（二氧化硅：SiO_2）的形状。



●图2.A4　MOS-FET的原理图

在这里，不向栅极加电压时，源极与漏极之间形成N-P-N。这种情况下，给漏极加正偏压，给源极加负偏压时，也就是说，源极与漏极之间即使加电压电流也不会流动。但是，如果给栅极加正偏压时，通过 SiO_2 形成的氧化膜（显示了作为绝缘体的性质），P 型基板的一部分源极与漏极之间会形成 N 型半导体的薄层。这称为 N 沟道，N 沟道形成时，电流就会从漏极流向源极。

因为栅极的一部分有绝缘膜，所以栅极电流几乎不会流动。因此，这 MOS-FET 形成通过栅极电压可以控制漏极电流的结构。

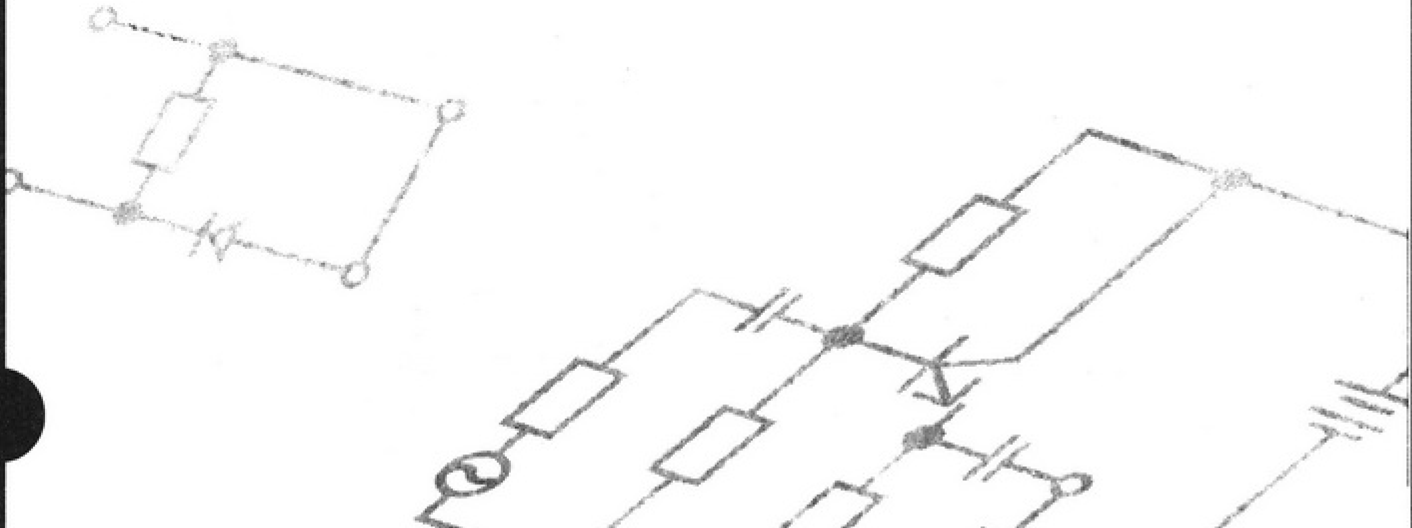
双极晶体管与 FET 的差异

双极晶体管其动作的主体有两个，即电子和空穴，因为动作主体有两个所以叫做双极管。但是，FET 的情况时，无论是 J-FET 还是 MOS-FET，动作的主体领域是单一的，所以叫做单极晶体管。

同时，两者的电流控制方法也不同，双极晶体管是用基极电流控制发射极电流的，而单极晶体管是用栅极电压控制漏极电流的。

第3章

电气电路的知识




午休时间
那今天要吃什么呢？
学长！
小绫，怎么了？社团活动还没开始呢。
今天我给学长带盒饭来了。
我们一起吃吧。
……
谢谢你！



在教室里吃我会不好意思，这里可以吧？
电子社会
招
募
员
学长说可以的话，哪里都没问题。
那么，赶快看一下盒饭里面的东西吧。
只有这个吗？！！
怎么会！
菜我另外准备了。
呵呵呵……
啊？

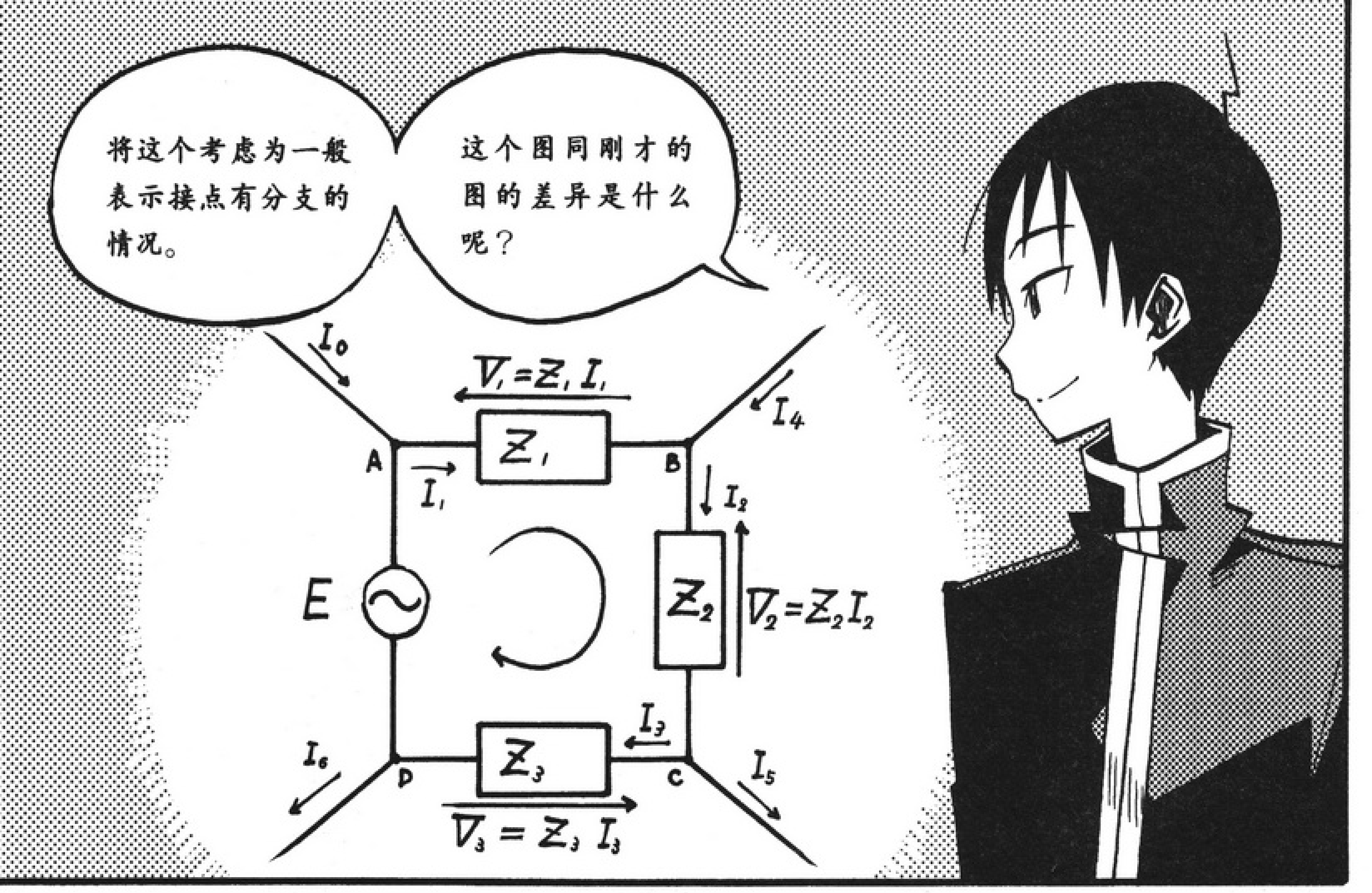

哇
那么，
哈—♡
请吃吧！
哇
这是什么啊?
这是我为学长做的。
这么好的东西……我实在不敢当，我不能吃。
呜呜
莫非你不喜欢？
这可是正宗的法餐。
不，不是那样的。
那我吃就是了。


谢谢！
我吃好了。
好吃吗？
嗯，很好吃，谢谢你！
太好了。
了解电气电路
喂，学长！
嗯？
想要学好电子电路，
电气电路的知识是必需的吗？
了解电气电路

1. 基尔霍夫定律


〈电路分析〉
电气电路的知识是必需的。你还是记住基尔霍夫定律比较好。
基尔？那是什么呀？
基尔霍夫定律有两种，
任何一个在电子电路中，都是计算电路中流动的电流或加在电阻中的电压所必需的。
这个计算就叫做电路分析。
是这样的啊。
哗啦
虽然离社团活动时间还早，很难得，我就先教你吧。
好的。


〈基尔霍夫的第1定律和第2定律〉
基尔霍夫的第1定律是这样的定律。
流入1个接点的电力总和是0。
I_1
I_2
I_3
流入中心点的电流 I_1 和 I_2 的总和等于流出电流 I_3 的总和
它也被称为电流守恒定律。
接下来是这个图。
这个图表示了基尔霍夫的第2定律。
I
$V_1 = Z_1 I$
Z_1
A
B
E
Z_2
$V_2 = Z_2 I$
Z_3
D
C
$V_3 = Z_3 I$
这里意味着电流驱动电压 E 等于负荷 Z_1、Z_2、Z_3 中的电压降 Z_1I、Z_2I、Z_3I 的总和。
为了不把 Z 与2弄错，书写时写为Ƶ。
这是什么呀？



将这个考虑为一般表示接点有分支的情况。
这个图同刚才的图的差异是什么呢？
I_0
$V_1 = Z_1 I_1$
I_4
A
Z_1
B
I_1
I_2
E
Z_2
$V_2 = Z_2 I_2$
I_3
I_6
D
Z_3
C
I_5
$V_3 = Z_3 I_3$



接点ABCD带有分支，I的地方不同。



嗯，正确！
这时，意味着电流驱动电压E等于负荷Z_1、Z_2、Z_3中的电压降Z_1I_1、Z_2I_2、Z_3I_3的总和。
这就叫做基尔霍夫的第2定律。

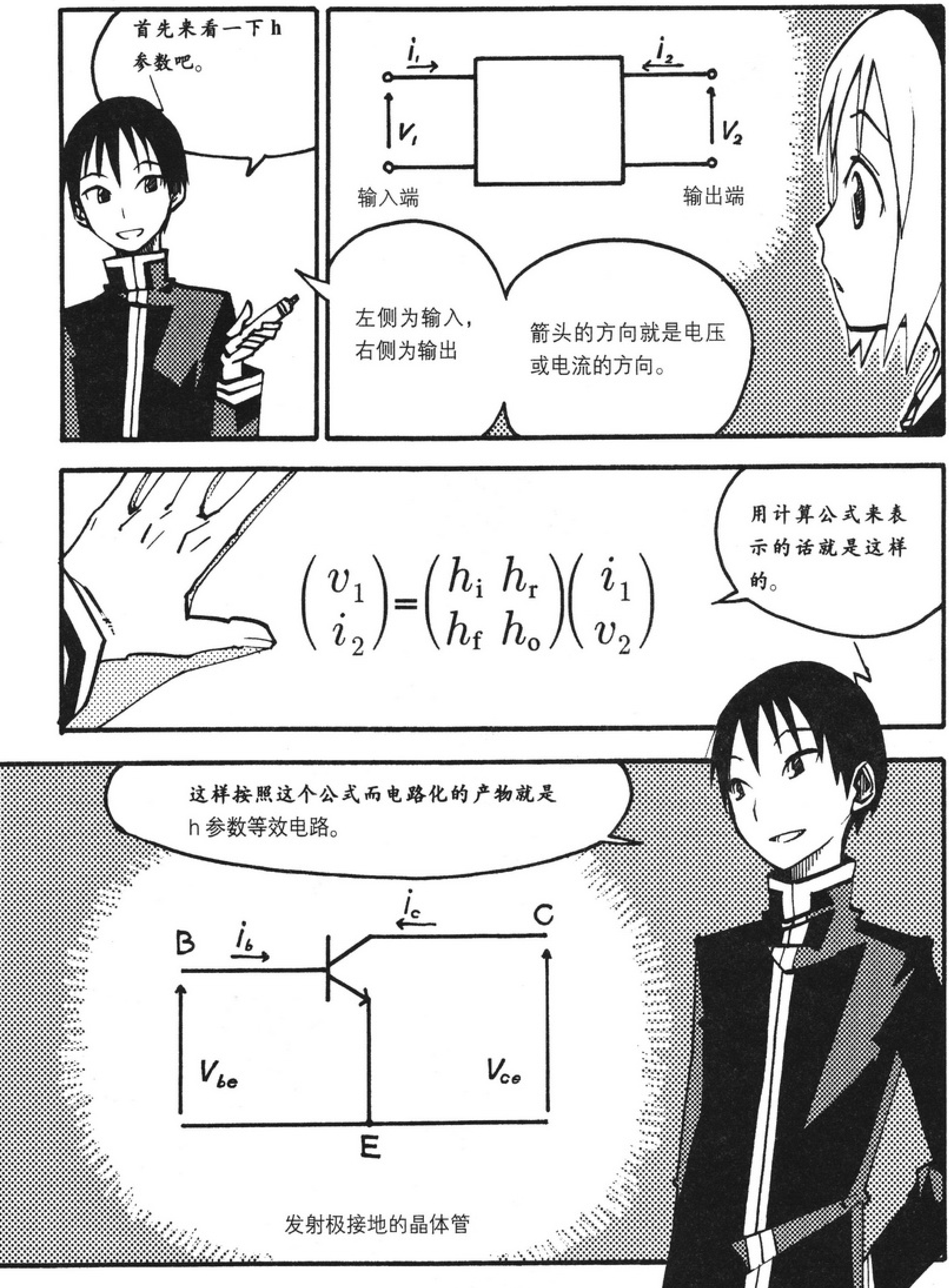
2. RLC 并联电路


我把 RLC 并联电路的内容也教给你吧。
那是什么呀？
首先，
希望你看一下将电阻（R）、线圈（L）和电容（C）并列连接的 RLC 并联电路。
就是这个！
R
L
C
RLC 并联电路
电路中的阻抗。
？
阻抗?
阻抗就是指电阻成分呀。我没有解释过吧。
挡住！


V R L C
电路中的阻抗 Z 如果作为电源 V 的角频率
$\omega=2\pi f$，
$\frac{1}{Z}=\frac{1}{R}+j\omega c+\frac{1}{j\omega L}$
这个关系将成立。
这个公式中如果 $\omega=\frac{1}{\sqrt{LC}}$ 的话，
则 $Z=R$。
V R L C
这时，这个电路称为
RLC 并联电路。
这起什么作用啊？
利用此并联电路的性质，用调谐
放大器可以调想听的电台频率。

3. h 参数等效电路

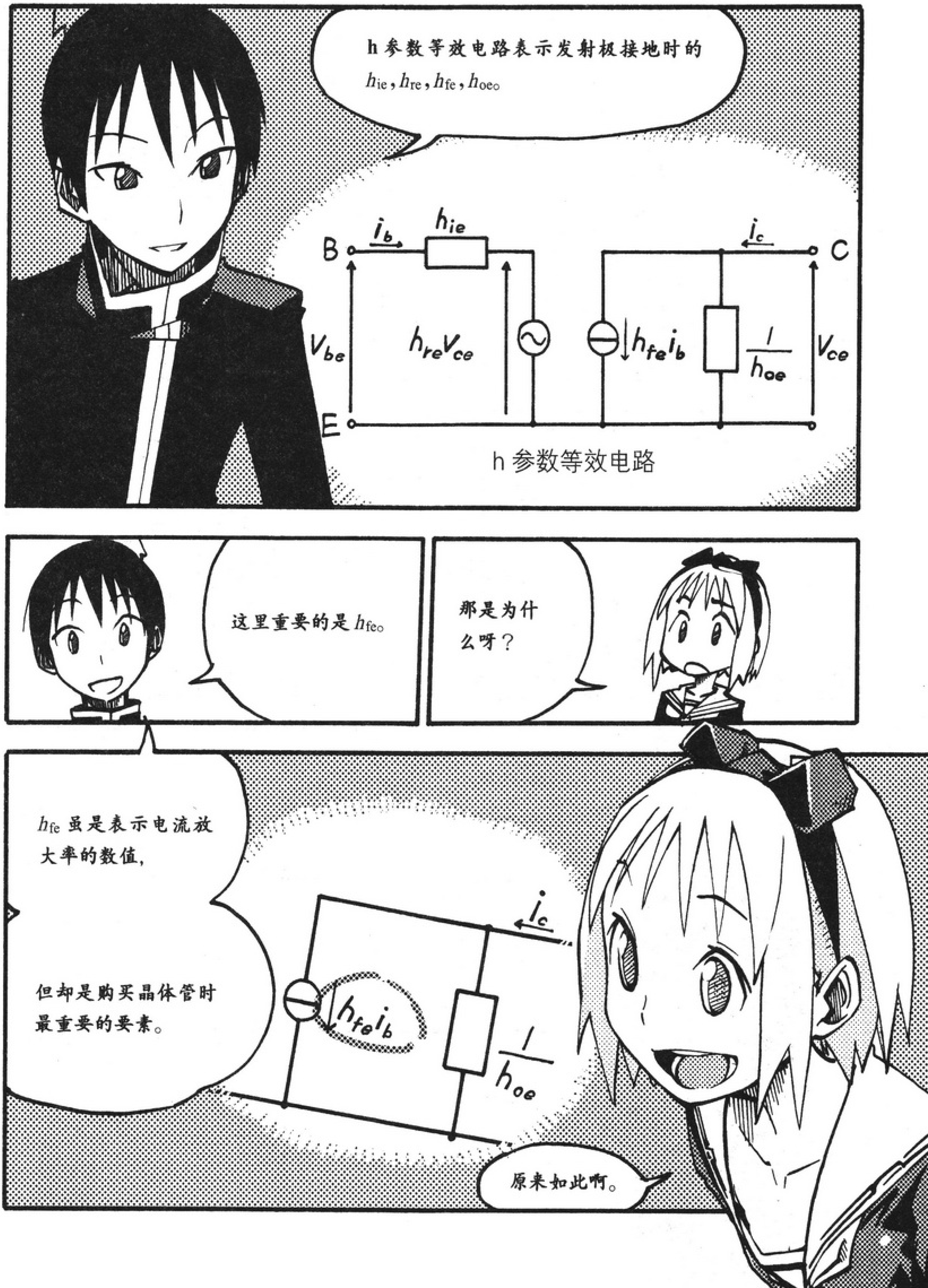

即使了解基尔霍夫定律也不可以吗？那怎么做可以啊？
不过，
在晶体管保持原有状态的情况时则不能进行电路分析。
必须使用电阻、电压和电流源来表现。
为此使用的指标称为h 参数等效电路。
唉，H?！
学长！
黄色书籍
不要想歪了啊！
好吧！

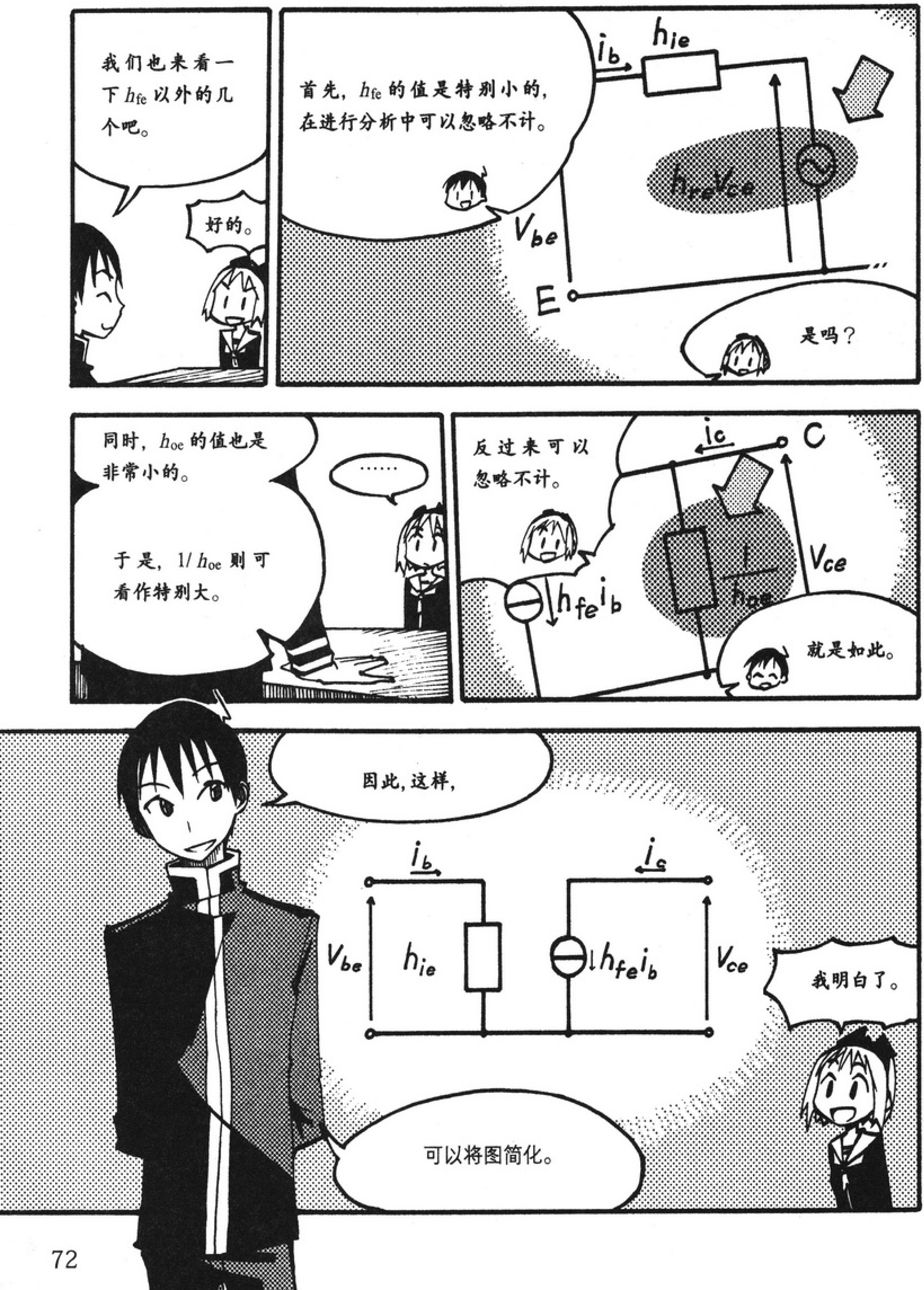


首先来看一下 h 参数吧。
i_1
i_2
V_1
V_2
输入端
输出端
左侧为输入，右侧为输出
箭头的方向就是电压或电流的方向。
$$\begin{pmatrix} v_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_i & h_r \\ h_f & h_o \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$$
用计算公式来表示的话就是这样的。
这样按照这个公式而电路化的产物就是 h 参数等效电路。
B
i_b
i_c
C
V_{be}
V_{ce}
E
发射极接地的晶体管


这个公式的4个h都是什么含义啊？
$\begin{pmatrix} v_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_i & h_r \\ h_f & h_o \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$
你问得很好！
公式中的h各自是这样的含义。
啊？
h_i— 输入阻抗
从输入一侧来看的电阻成分
h_r— 反向电压增益
数字表示输入电压是输出电压的几倍
h_f— 电流增益
数字表示输出电流是输入电流的几倍
h_o— 输出导纳
从输出一侧来看的电阻成分的倒数


这样，h 参数……
就包含了阻抗的次元，或阻抗的倒数的次元即无次元数
（单位达不到的数）等各种各样的次元参数。
啊，有点像宇宙呢。
那么，
你认为 h 参数的 h 是什么的省略？
嗯，嗯。
它是 hybrid 的 h 呀。
混合物！！
有生态学的感觉，
真帅！
姑且说一下，与生态学完全没关系。
混合制服


h参数等效电路表示发射极接地时的h_{ie}，h_{re}，h_{fe}，h_{oe}。
B
i_b
h_{ie}
i_c
C
V_{be}
$h_{re}V_{ce}$
$h_{fe}i_b$
$\frac{1}{h_{oe}}$
V_{ce}
E
h参数等效电路
这里重要的是h_{fe}。
那是为什么呀？
h_{fe}虽是表示电流放大率的数值，
i_c
$h_{fe}i_b$
$\frac{1}{h_{oe}}$
但却是购买晶体管时最重要的要素。
原来如此啊。


我们也来看一下 h_{fe} 以外的几个吧。
好的。
首先，h_{fe} 的值是特别小的，在进行分析中可以忽略不计。
i_b
h_{ie}
$h_{re}V_{ce}$
V_{be}
E
是吗？
同时，h_{oe} 的值也是非常小的。
于是，$1/h_{oe}$ 则可看作特别大。
……
反过来可以忽略不计。
i_c
C
V_{ce}
$h_{fe}i_b$
就是如此。
因此，这样，
i_b
i_c
V_{be}
h_{ie}
$h_{fe}i_b$
V_{ce}
可以将图简化。
我明白了。


……
午休就要结束了呀，
我们回去吧！
好的。
书籍扫描：铜板+西瓜
那个，学长……
嗯？
学长在假日都做些
什么呀？
假日？
嗯。
读读书，看看电影什么
的，总是很闲的吧。
这周也是一个
人在家看家啊。
哈


这个星期日……
嗯?!
父母预定要去参加朋友的婚礼，
我一个人逍遥自在。
噌…
一个人在家？
一个人？
学长，
我可以去你家玩吗?
可不可以？！
啊
啊
啊
啊！
嗯
可以是可以……
好恐怖的脸啊……

补充知识

电压源与电流源

电源有产生一定电压的电压源和产生一定电流的电流源两种。图 3.A1 中表示的是一般性使用的电源符号，左侧为直流的电压源、右侧为交流的电压源。一般来说，因为电压源与电流源存在内阻，所以并不能提取出很多的电力。



●图3.A1　一般性使用的电源符号

图 3.A2 表示的是理想电源。如果是理想电压源，v=0 时可以将其看作是短路；如果 $v \neq 0$ 时，与负载的大小无关，可以提取一定的电压。如果是理想电流源，i=0 时可以将其看作是开放状态；如果 $i \neq 0$ 时，与负载的大小无关，可以提取一定的电压。但是，理想电源是不能进行等效互换的。换言之，电压源与电流源之间不能进行互换。只有存在内阻才能进行这样的互换。



●图3.A2　理想电源

电压放大率

电压放大率可以用输入电压与输出电压之比来表示。这个数值比 1 大时可以说电压被放大了。与此相反，这个数值比 1 小时则电压在衰减。

$$A_v=\frac{v_{out}}{v_{in}}$$

$$A_v=20\lg\left|\frac{v_{out}}{v_{in}}\right|(dB)$$

这样，电压放大率有两种书写方式。上面的书写方式是表示一般性的比率，也可以表示相位。下面的书写方式是以分贝（dB）为单位来表示的，电子电路的情况时，原来也可用于进行信号处理等。用分贝表示时，如果电压被放大了，得到的是正值，可以说如果增加 20（dB）电压放大率则变为 10 倍，但却不能知道相位。

电流放大率

电流放大率的值可以用输入电流与输出电流之比得到。

$$A_i=\frac{i_{out}}{i_{in}}$$

$$A_i=20\lg\left|\frac{i_{out}}{i_{in}}\right|(dB)$$

这也有两种书写方式。

考察电流放大率的频率特性时，频率为$\frac{i_{out}=i_{in}}{\sqrt{2}}$则称为断路频率。这时的电流放大率大概为-3dB。

关于虚数 i 与 j

使用复数时，在数学领域里一般书写为$\sqrt{-1}$=i，但在电气和电子等领域里写为$\sqrt{-1}$=j。其理由在于，i 是用于表示电流的变量，为了不使两者混淆。本书也是关于电子电路的内容，所以也以$\sqrt{-1}$=j来表示。

第4章

调谐放大电路




星期日
我把路记得相当清楚，完全没问题。
哈
真可怕……
可咚
来啦！
学长，我到了。
可咚
可咚
这里，这里。
紫电

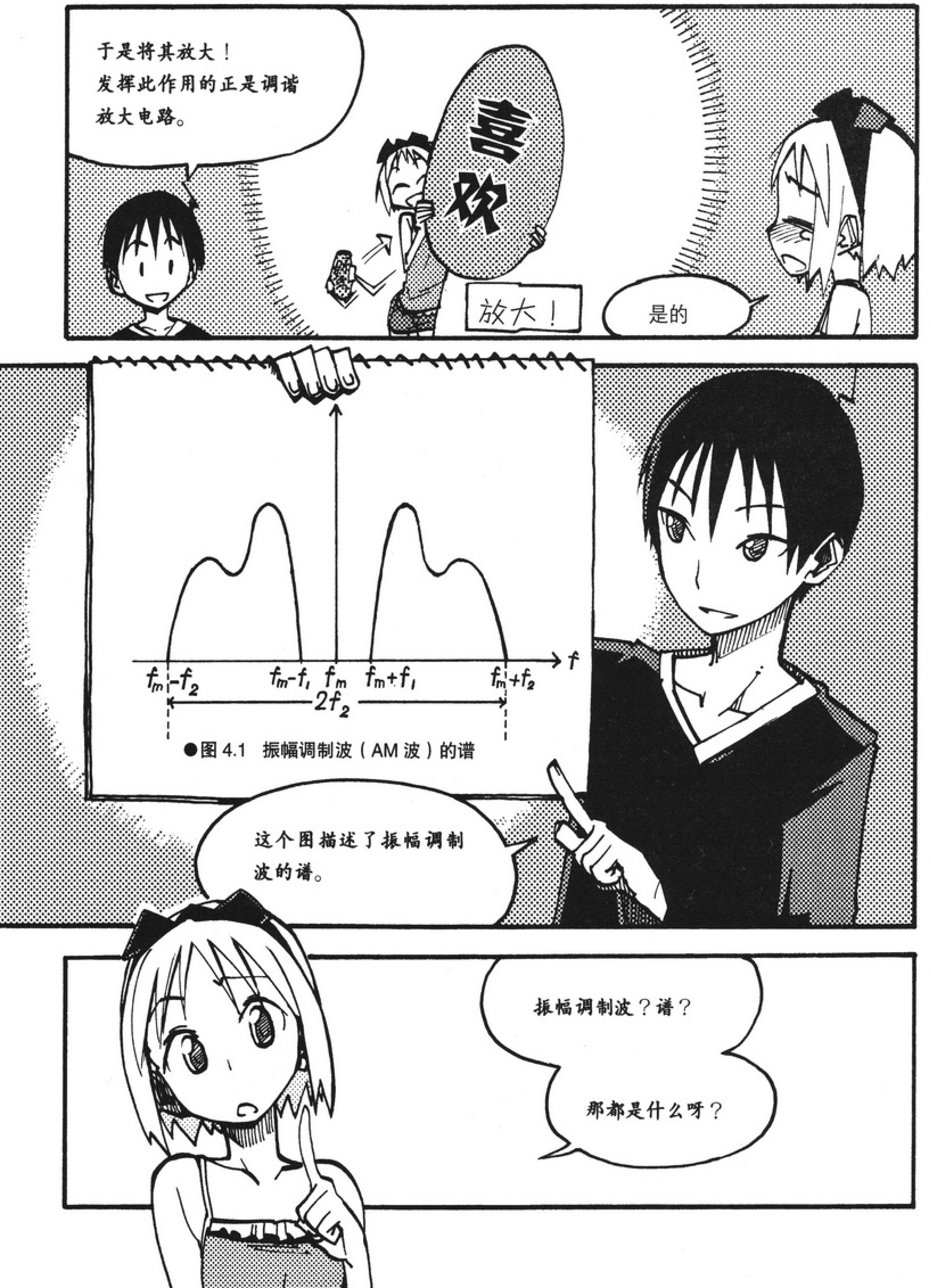

对不起。
啊！
我一直在等你呢。
那你快进来吧。
好的。



哇，这就是学长的
房间呀。
什么都没有啊。
没有那回事！只要与学长在一起，我其他都不需要。我也不想要。
呵呵
什么意思？
什么什么
意思？
？
对了，难得你来了，今天就在这里继续做社团活动吧！
难得小绫这么
喜欢社团活动。
……
啊？！

1. 调谐放大电路的原理

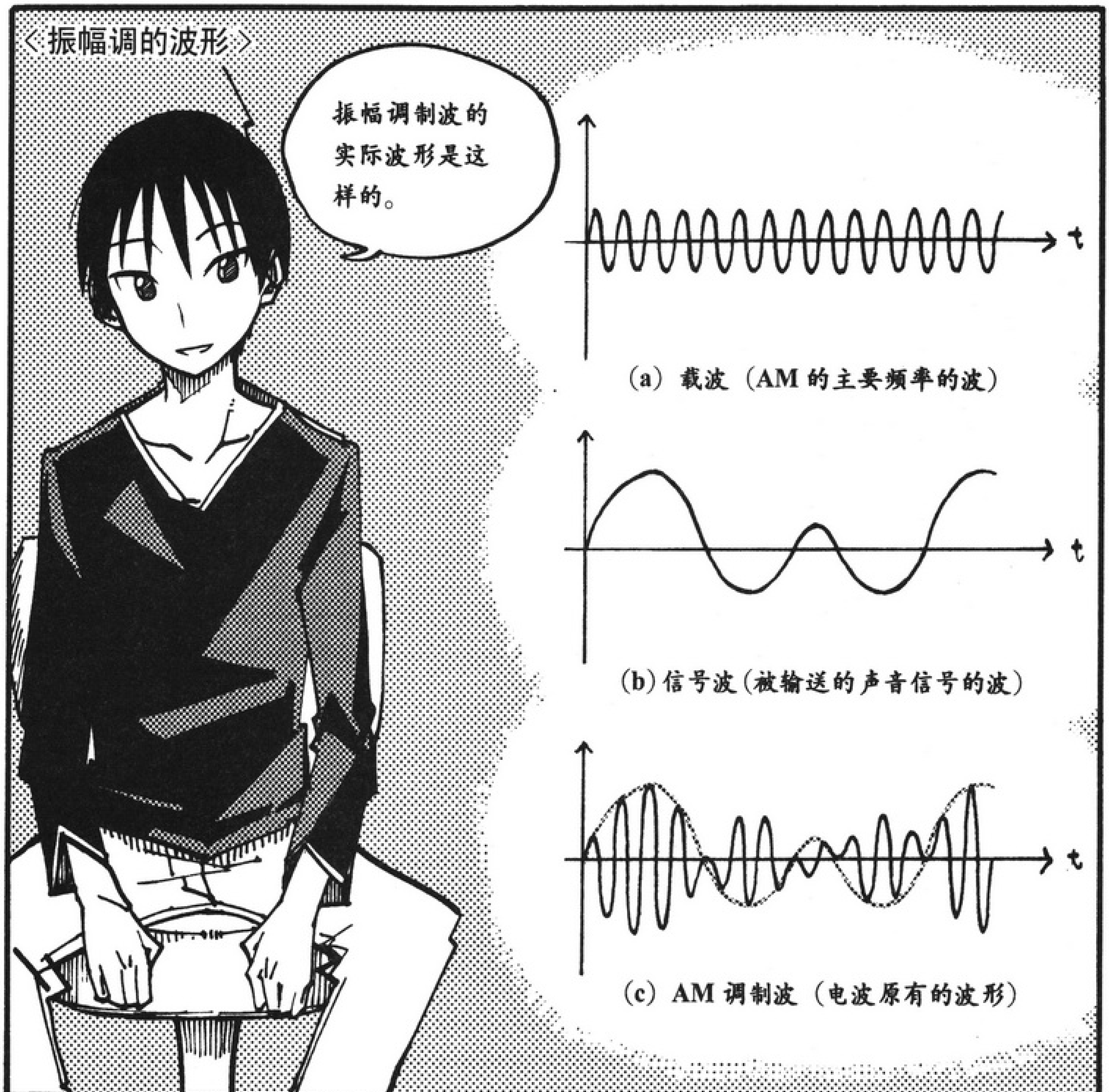

你知道调谐放大电路吗？
……
电波中包含各种频道的电波，
如果不是只选择必要的频道，就会听到各种声音混杂在一起。
……
因此，从天线接收到的电波中，
只提取必要的频率部分……
提取！



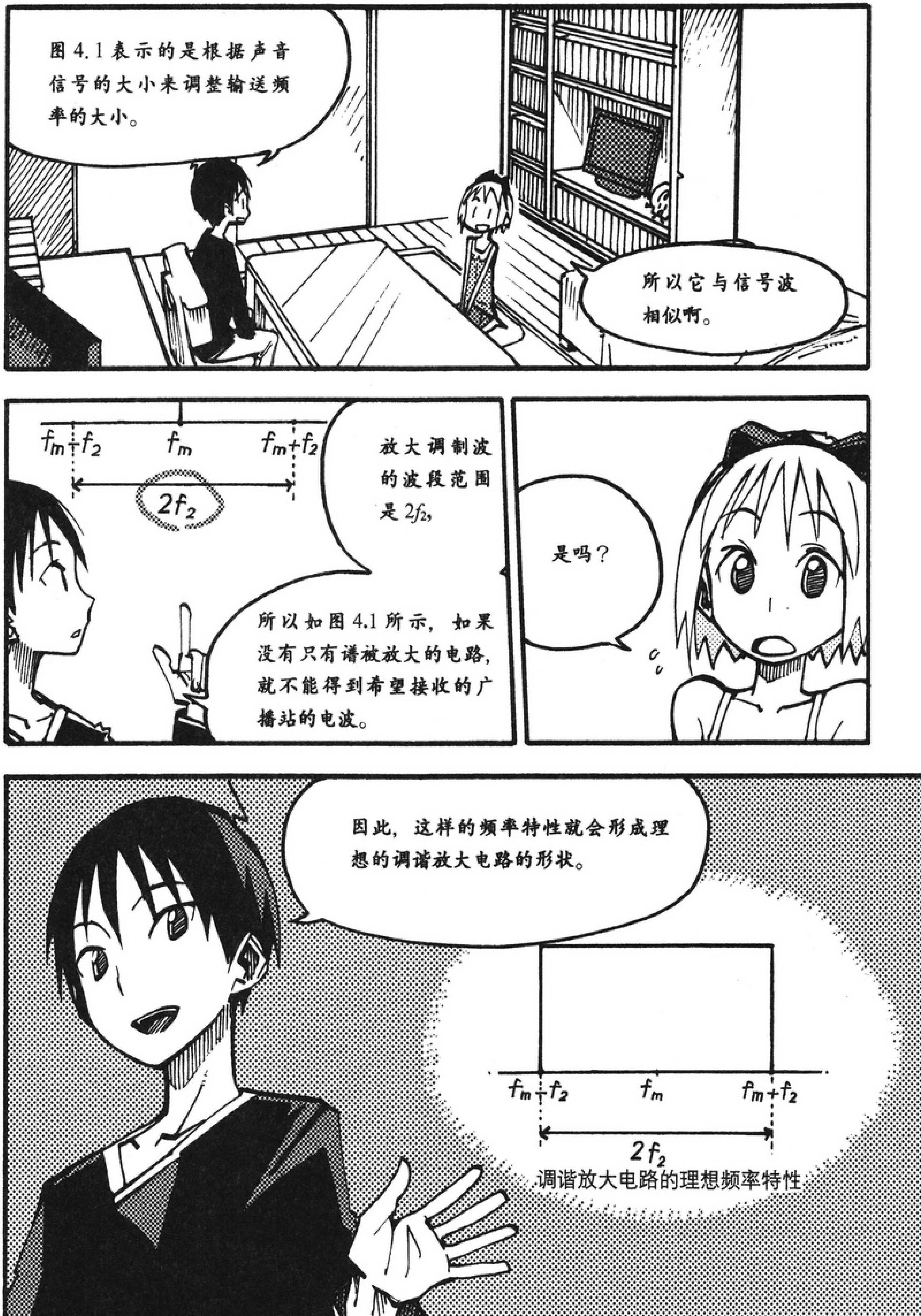
于是将其放大！发挥此作用的正是调谐放大电路。
喜欢
放大！
是的
f
f_m-f_2
f_m-f_1
f_m
f_m+f_1
f_m+f_2
$2f_2$
●图 4.1　振幅调制波（AM 波）的谱
这个图描述了振幅调制波的谱。
振幅调制波？谱？
那都是什么呀？

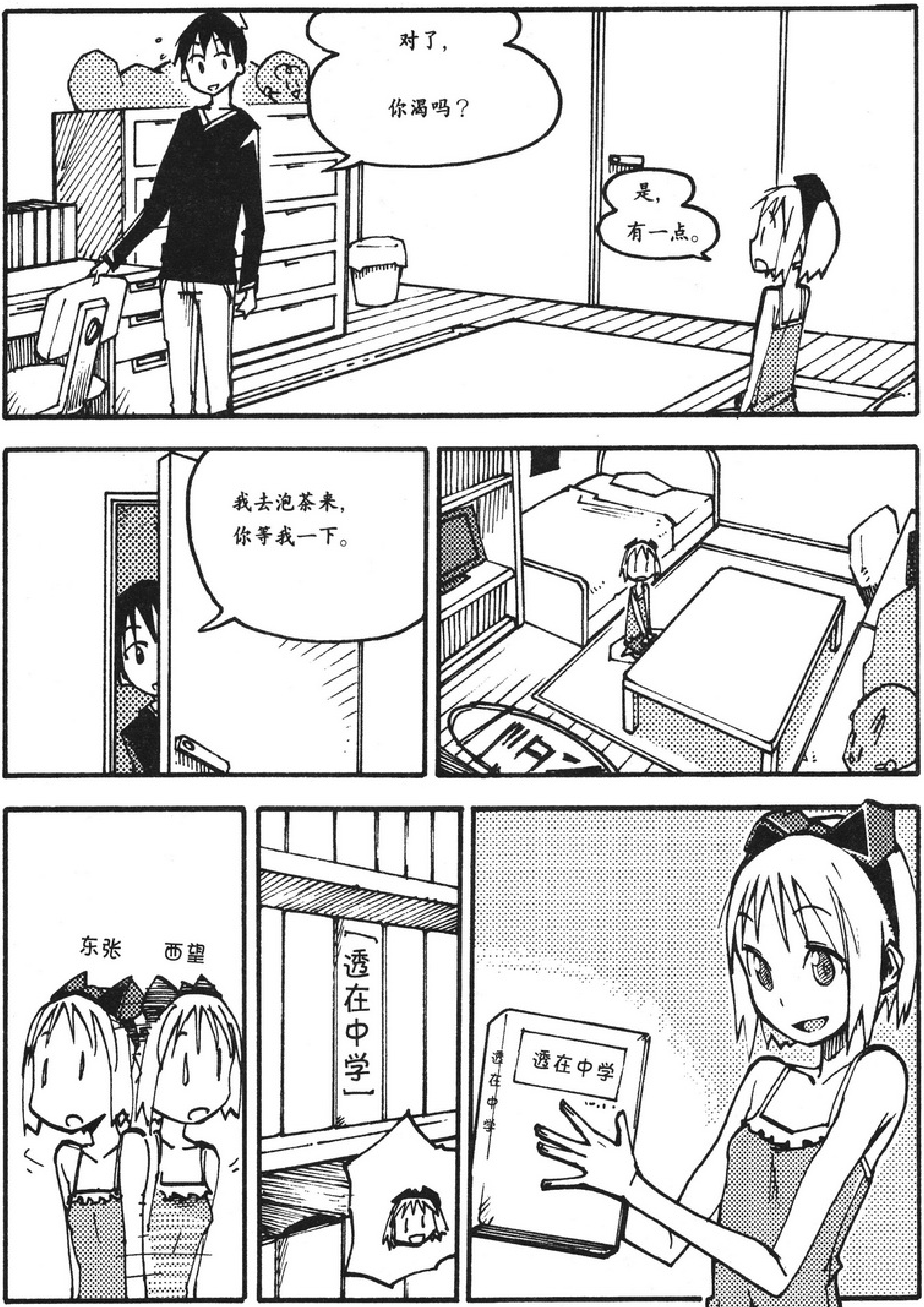


<何为振幅调制波>
所谓振幅调制波是指在AM收音机中使用的波。
以输送频率fm为中心，并添加了音谱。
fm
所谓输送频率是指选择广播站时必需的频率。
AM 530 600 700
例如，
NHK广播第1频道就是AM594kHz。
是啊。
同时，
所谓谱是以频率为横轴、以其频率信号的大小为纵轴。
信号的大小
频率
fm-f2
fm-f1
fm
fm+f1
fm+f2
2f2


<振幅调的波形>
振幅调制波的实际波形是这样的。
t
(a) 载波（AM 的主要频率的波）
t
(b) 信号波（被输送的声音信号的波）
t
(c) AM 调制波（电波原有的波形）

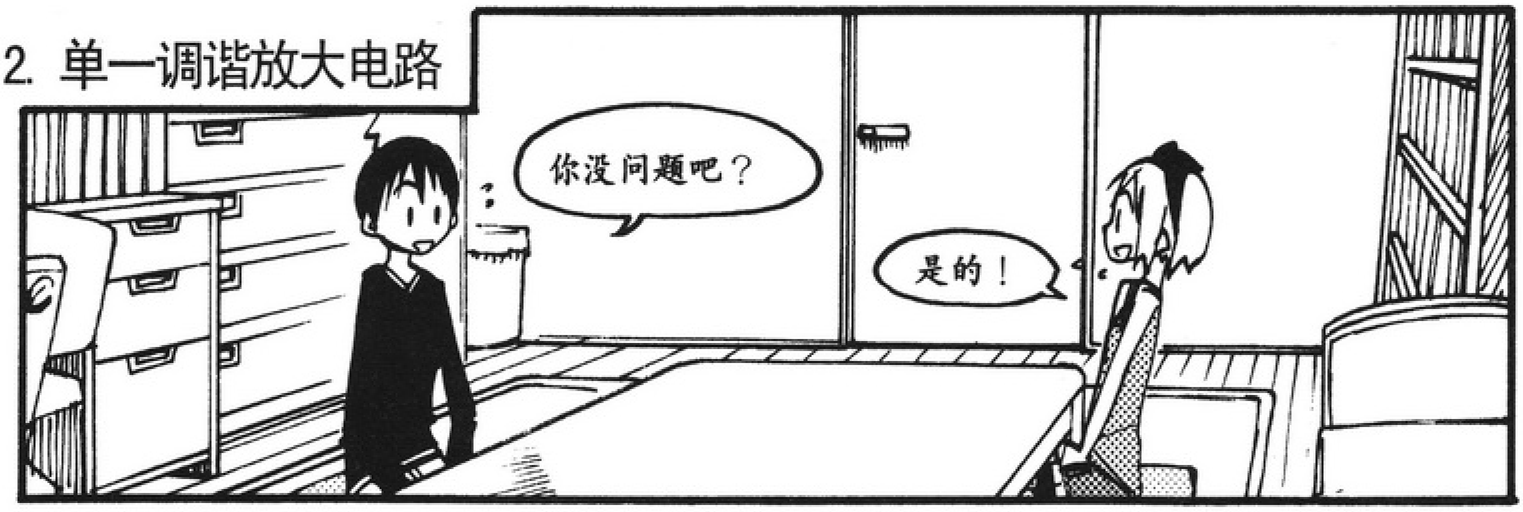

谱则可以考虑如刚才的图4.1一样。
唉！

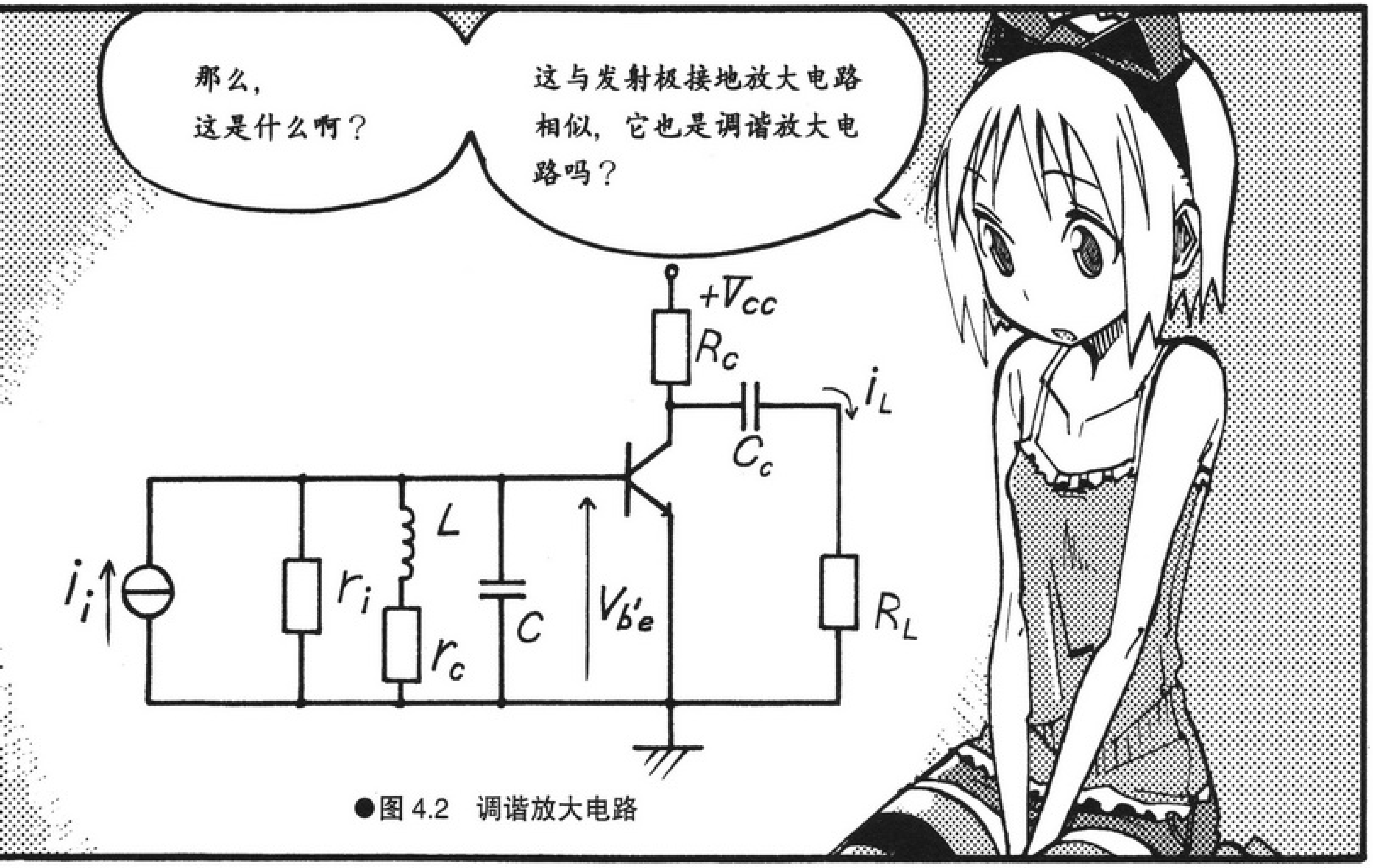

图 4.1 表示的是根据声音信号的大小来调整输送频率的大小。
所以它与信号波相似啊。
f_m-f_2
f_m
f_m+f_2
$2f_2$
放大调制波的波段范围是 $2f_2$，
所以如图 4.1 所示，如果没有只有谐被放大的电路，就不能得到希望接收的广播站的电波。
是吗？
因此，这样的频率特性就会形成理想的调谐放大电路的形状。
f_m-f_2
f_m
f_m+f_2
$2f_2$
调谐放大电路的理想频率特性


对了，
你渴吗？
是，
有一点。
我去泡茶来，
你等我一下。
东张
西望
透在中学
透在中学
透在中学

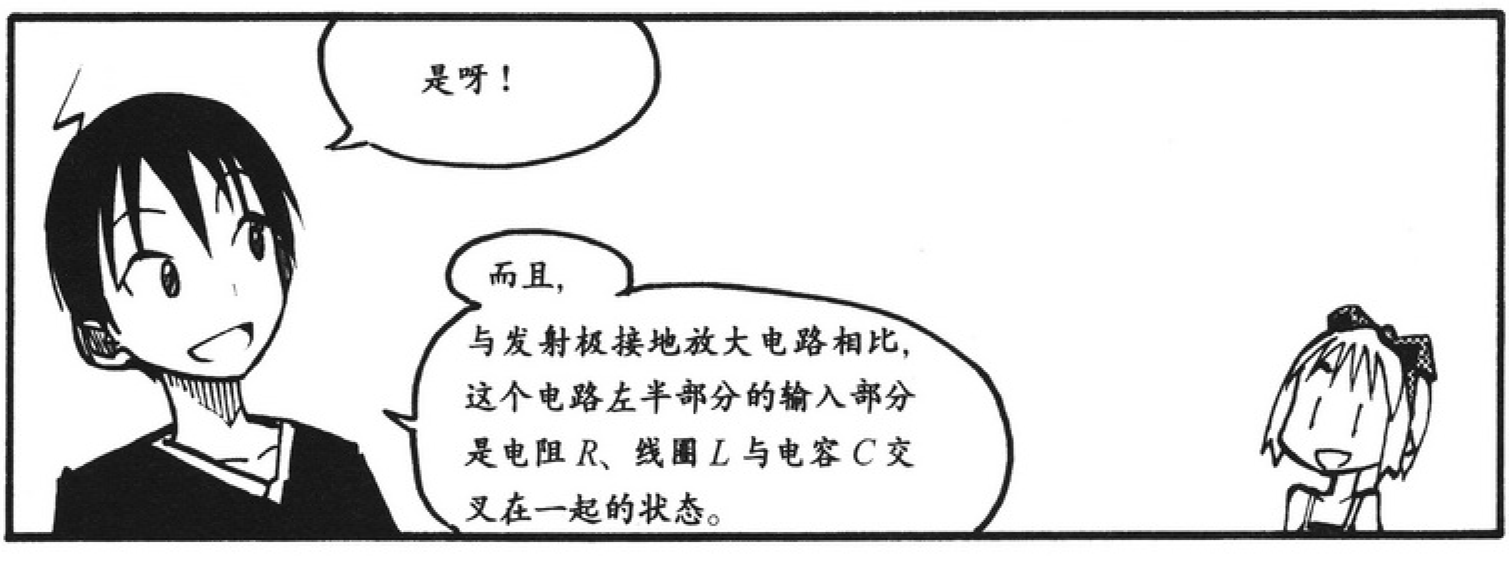

加油！
……
红茶可以吗?
吱
!!!
你怎么了？
没什么！我们还是赶快继续吧。
嗯……

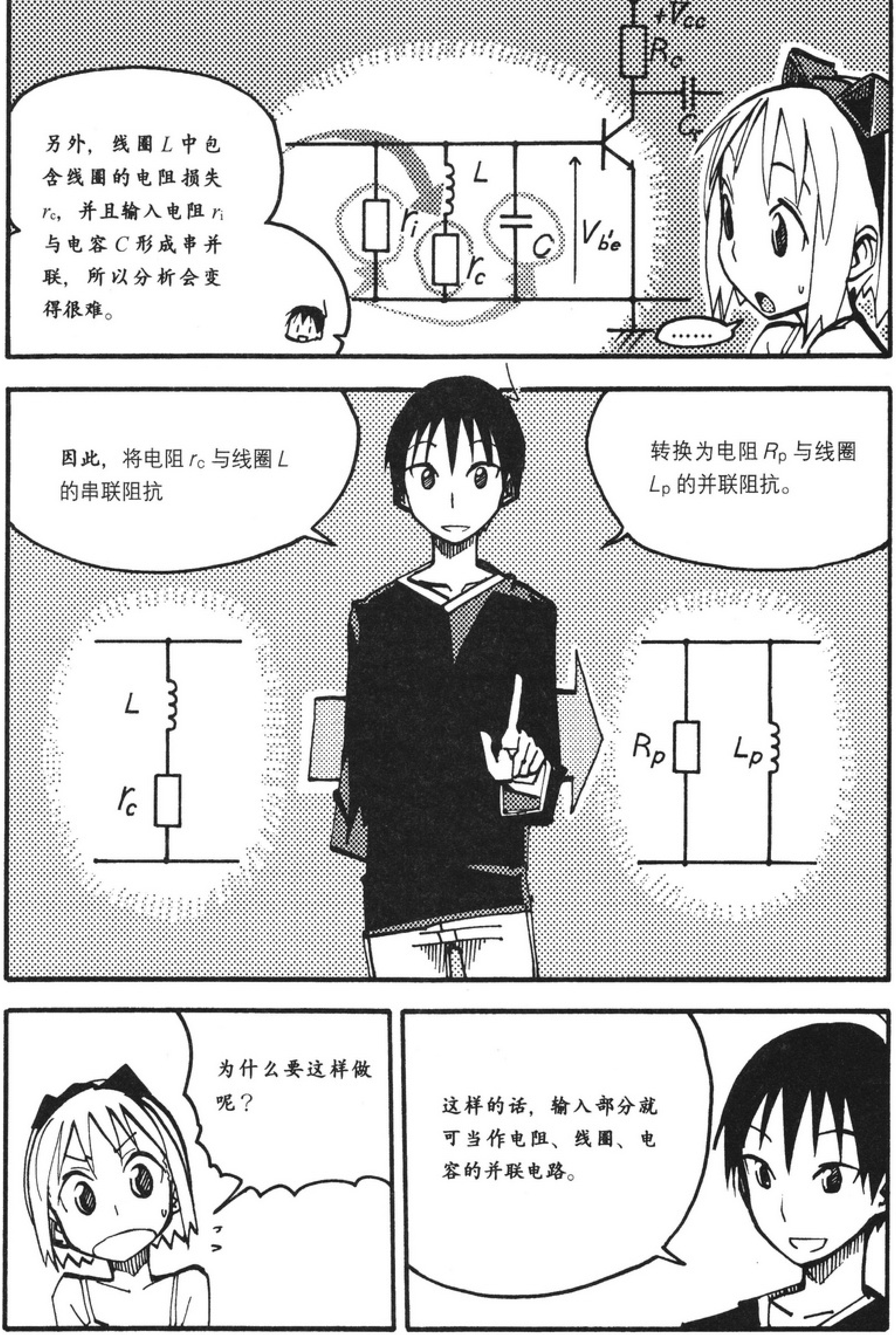
2. 单一调谐放大电路

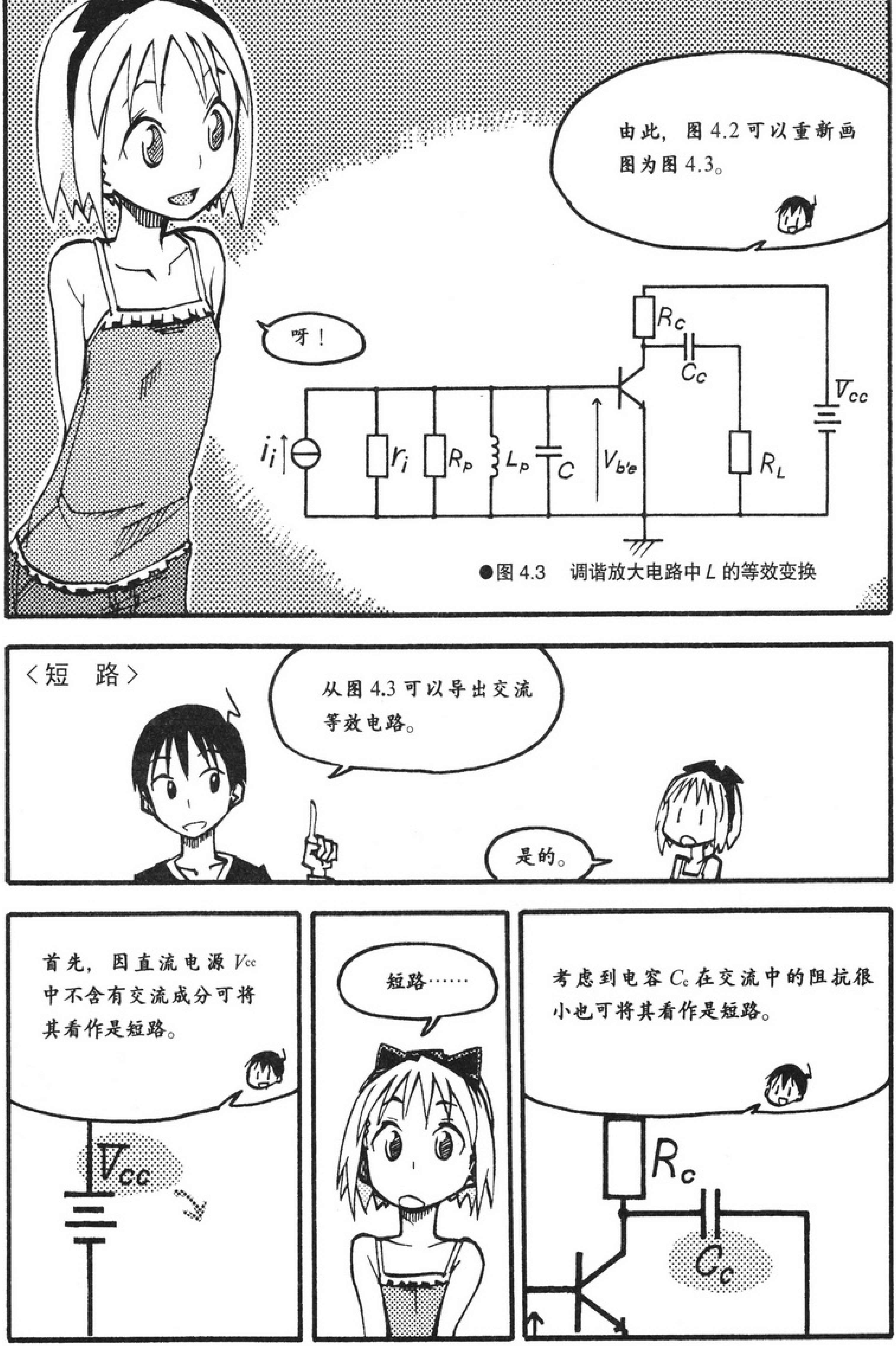




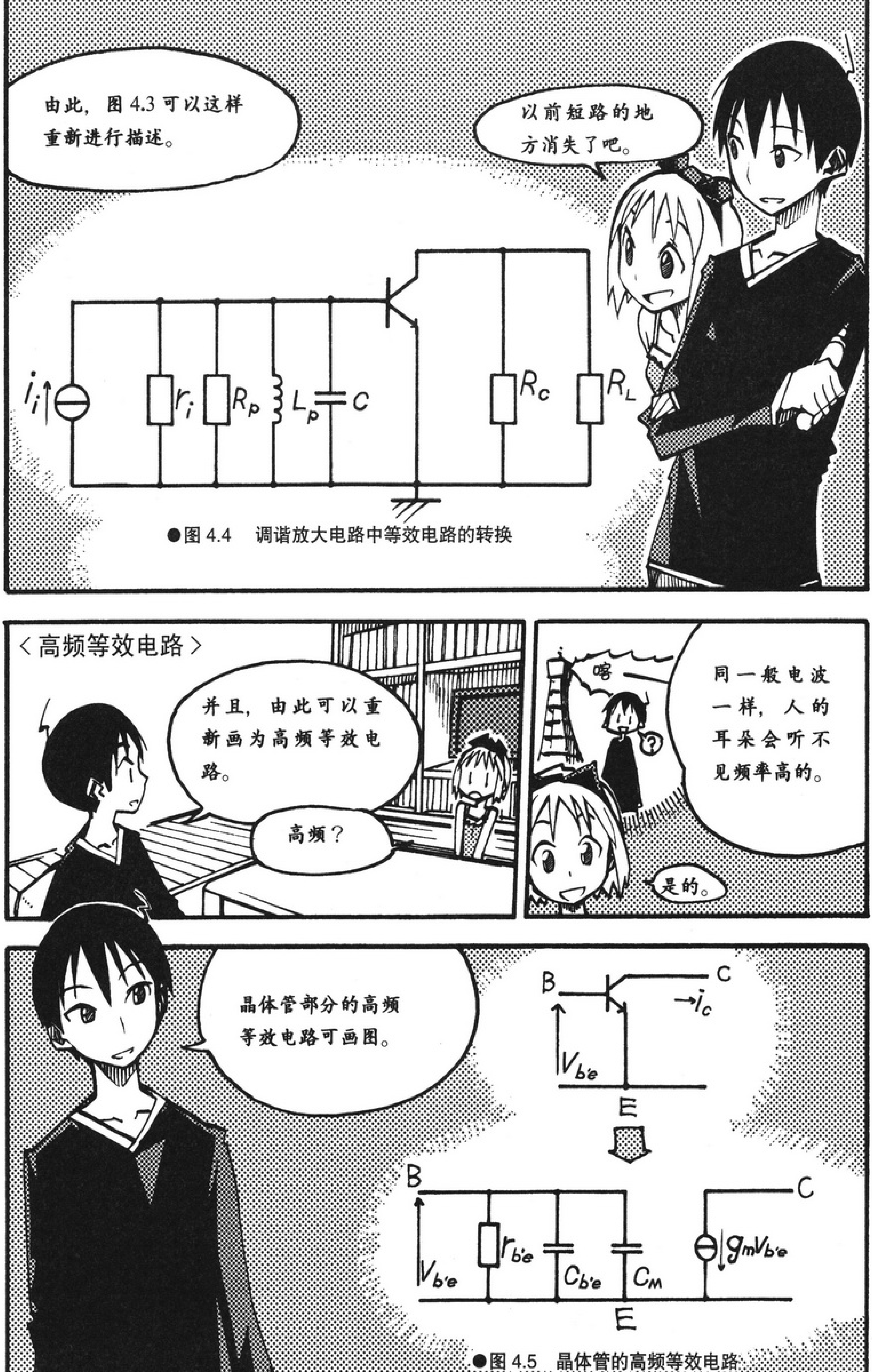
●图 4.2　调谐放大电路




+V_{cc}
R_c
C_T
另外，线圈L中包含线圈的电阻损失r_c，并且输入电阻r_i与电容C形成串并联，所以分析会变得很难。
L
r_i
r_c
C
$V_{b'e}$
……
因此，将电阻r_c与线圈L的串联阻抗
转换为电阻R_p与线圈L_p的并联阻抗。
L
r_c
R_p
L_p
为什么要这样做呢？
这样的话，输入部分就可当作电阻、线圈、电容的并联电路。



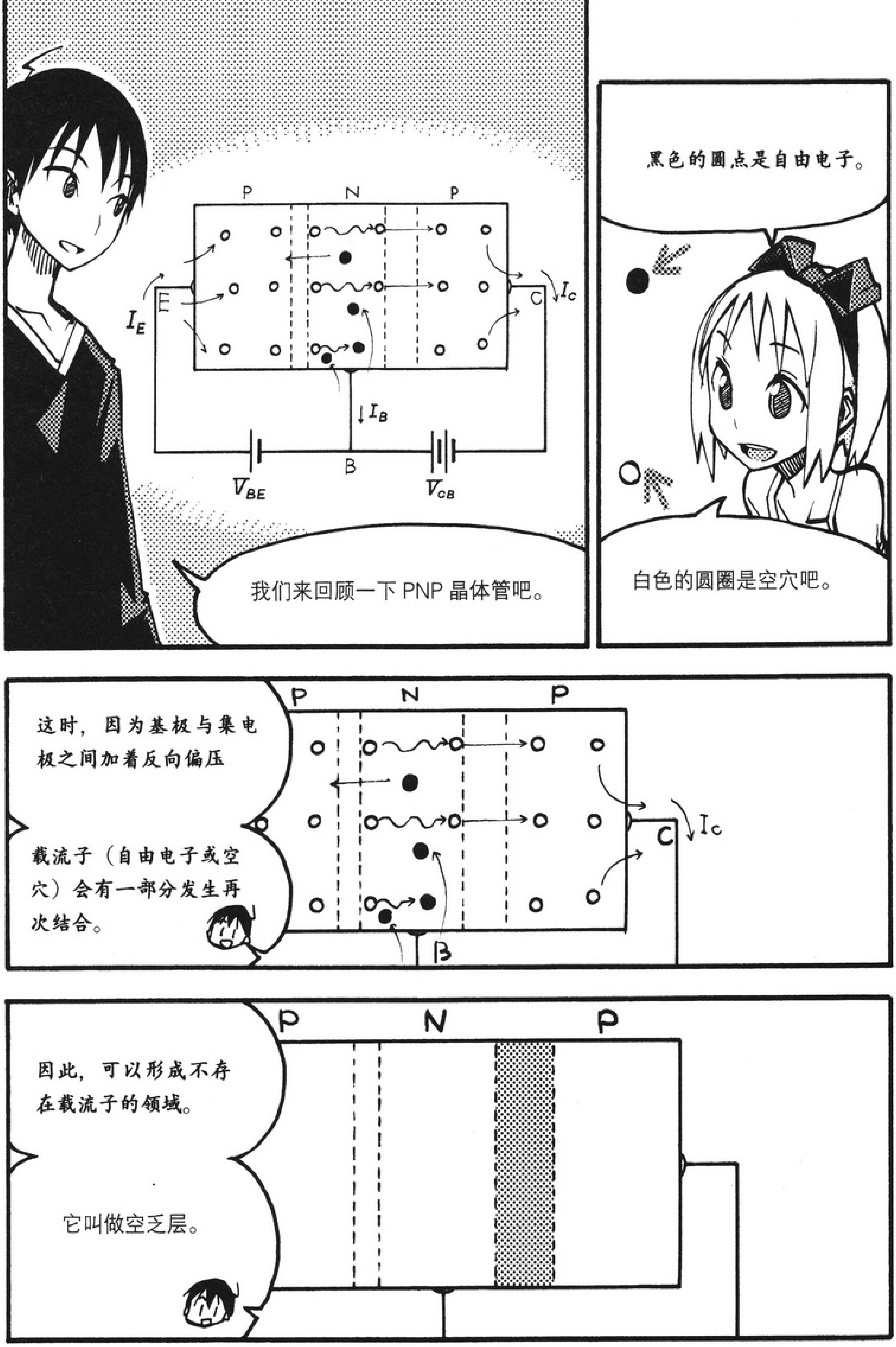
●图 4.3　调谐放大电路中 L 的等效变换



●图 4.4　调谐放大电路中等效电路的转换

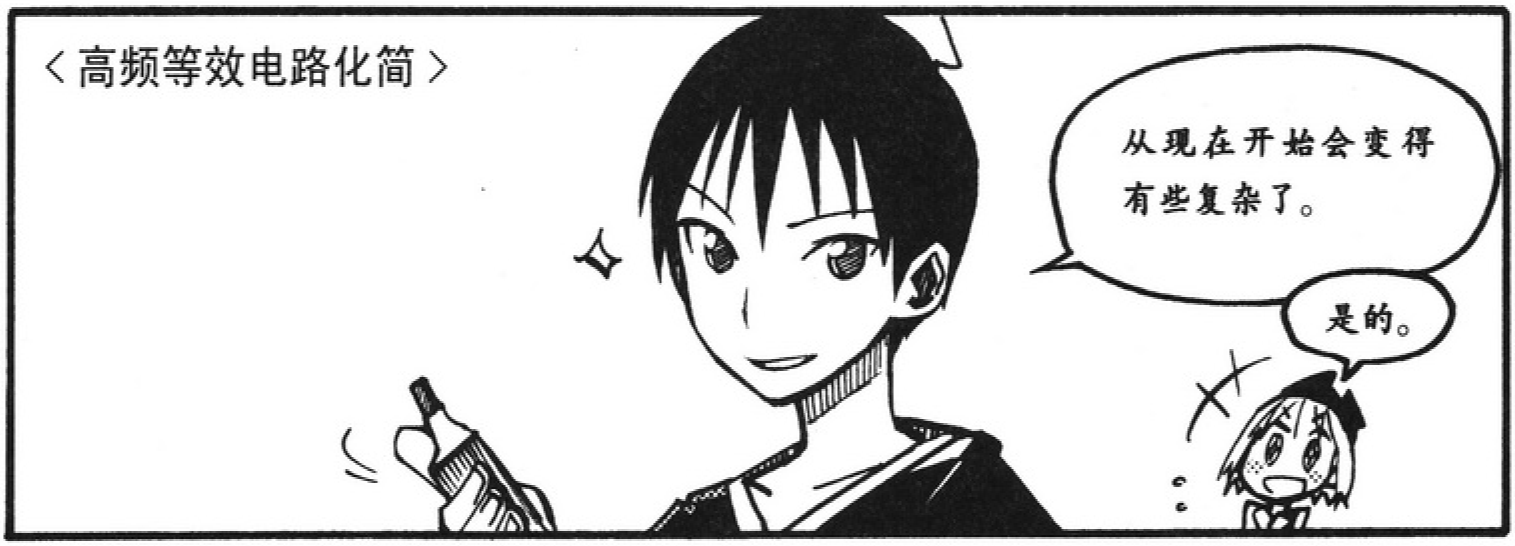
●图 4.5　晶体管的高频等效电路

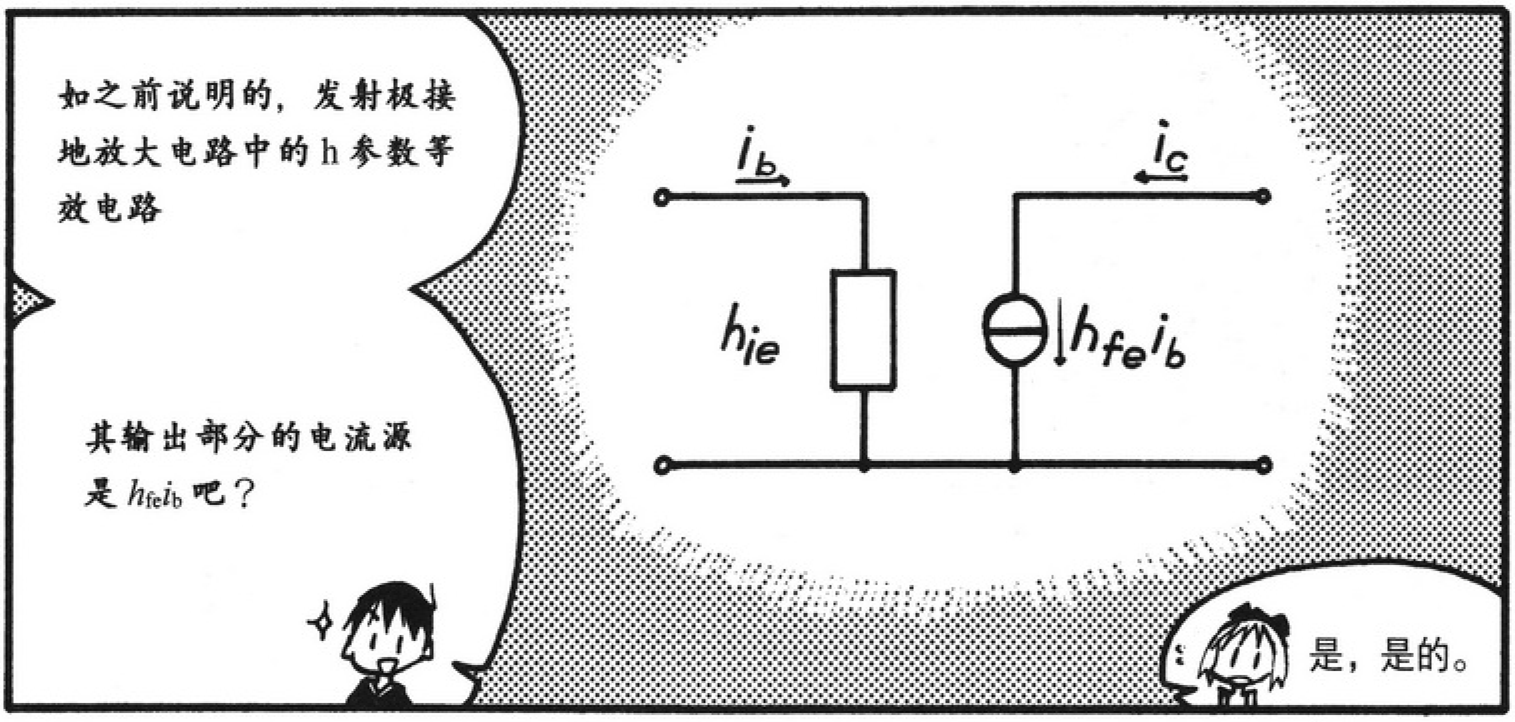

〈寄生容量与镜子效应〉
〈在高频等效电路中〉
B
C
$V_{b'e}$
$r_{b'e}$
$C_{b'e}$
C_M
$g_mV_{b'e}$
E
$r_{b'e}$ 基极与发射极之间出现的电阻
$C_{b'e}$ 在高频时基极与发射极之间出现的寄生容量
C_M 在高频时基极与集电极之间出现的考虑了镜子效应的寄生容量
3个关系成立。
但如果是这样，只有$C_{b'e}$也是可以的。
所谓的镜子效应是什么呀？
那个
寄生容量是什么啊？
基极与发射极之间如增加交流信号，这个区间会有如电容一样的现象。寄生容量就是指那个容量。
E
B
C
?
顺便说一下，信号的频率如果变高其容量也会增大。



我们来回顾一下 PNP 晶体管吧。
P
N
P
E
C
B
I_E
I_C
I_B
V_{BE}
V_{CB}
黑色的圆点是自由电子。
白色的圆圈是空穴吧。
这时，因为基极与集电极之间加着反向偏压
载流子（自由电子或空穴）会有一部分发生再次结合。
P
N
P
C
B
I_C
因此，可以形成不存在载流子的领域。
它叫做空乏层。
P
N
P


这个空乏层承担着电容的作用。
哦
低频时几乎没有此影响。
如变为高频，空乏层的容量突然增大为 $g_{m}R_{L}$ 倍。
低频时
（几乎没有）
高频时
（$g_{m}R_{L}$ 倍）
也就是说，所谓镜子效应就是在低频时容量特别小，一旦变为高频，
容量则急速增大的现象。你明白了吗？
？
是的，我会努力的。

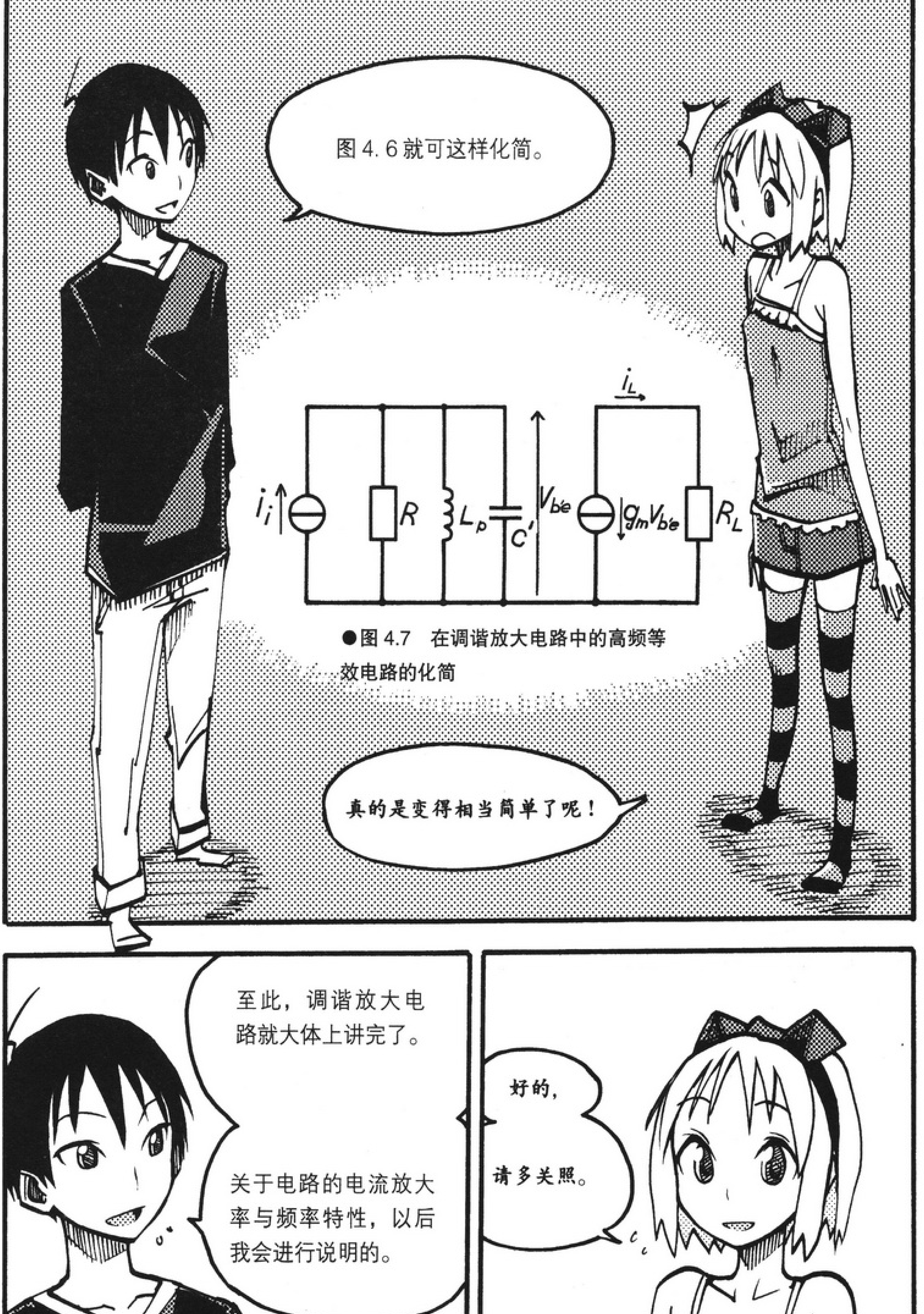

〈高频等效电路化简〉
从现在开始会变得有些复杂了。
是的。


如之前说明的，发射极接地放大电路中的h参数等效电路
其输出部分的电流源是$h_{fe}i_b$吧？
i_b
i_c
h_{ie}
$h_{fe}i_b$
是，是的。


但在输入一侧，相比用基极电流来考虑，
用基极与发射极之间的电压来考虑的话，更容易理解。
所以用$g_mv_{b'e}$代替电流源$h_{fe}i_b$来考虑。
$h_{fe}i_b$
$g_mv_{b'e}$
沙
沙



●图 4.6　调谐放大电路中的高频等效电路



●图 4.7 在调谐放大电路中的高频等效电路的化简


小绫真的很热心啊。
唉？
呵呵呵……
怎么说呢，就是有了伙伴的感觉，我很开心！
伙伴吗?
一直没有一起进行活动的人，我是很孤单的。


如果有更多像小绫这样喜欢电子电路的人来加入我们的电子社就好了。
嗯!
那样的话，社团活动就会更加热闹。
学长……
嗯?
噌

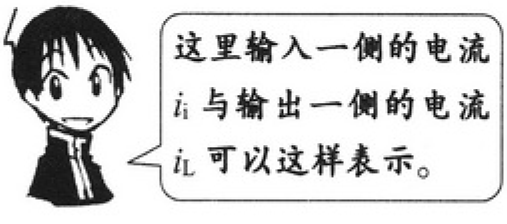

天快黑了，今天就到这里吧，我先回去了。
已经这个时候了吗？
今天谢谢你了。
再见！
哐当
小绫？
她怎么了呢？
突然……

补充知识

调谐放大器中的电流放大率的频率特性

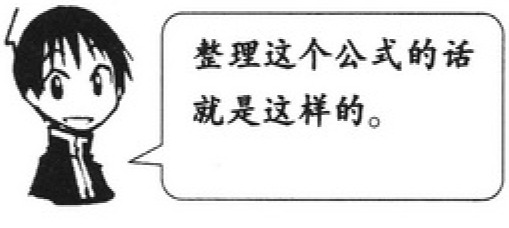
在图 4.7（P97）中，电流放大率 A_i 用输入一侧的电流 i_i 与输出一侧的电流 i_L 之比来表示。

$$A_i=\frac{i_L}{i_i}$$



$$i_i=\left(\frac{1}{R}+j\omega C'+\frac{1}{j\omega L_p}\right)v_i$$

$$i_L=-g_m v_{b'e}$$

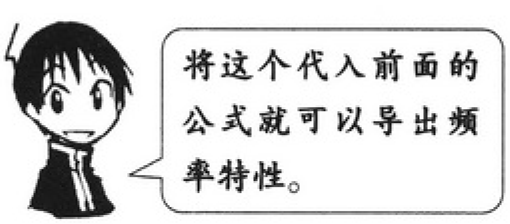


$$A_i=\frac{-g_m R}{1+jQ_i\left(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

这里，共振角频率（在输入一侧流动的电流最大时的角频率）为 ω_0，共振电路的品质因数（表示的是这个值越大，共振角频率中的 A_i 增大，共振角频率以外的 A_i 则减小）定为 Q_i，则可以定义为下面的公式。

$$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{L_p C'}}=2\pi f_0$$

$$Q_i=\frac{R}{\omega\ L_p}=\omega_0 C'R$$

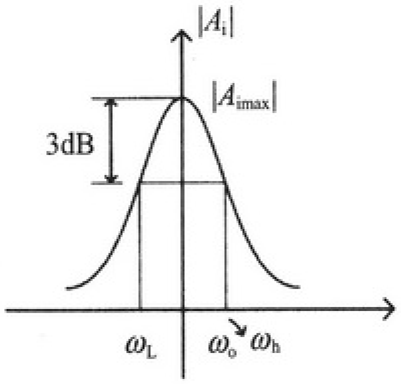


$$A_i=\frac{-g_m R}{1+jQ_i\left(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

利用此公式，我们试试来导出调谐放大器的频率特性吧。

$$|A_i|=\frac{g_m R}{\sqrt{1+Q_i^2\left(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega}\right)}}$$

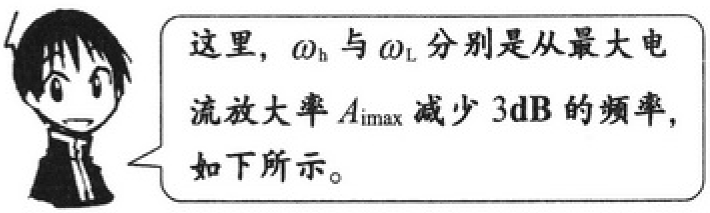
因此可以用以下的图来表示。



●图4.A1　调谐放大电路中的电流放大率的频率特性

图 4.A1 以角频率 ω(希腊字母) 为横轴，以电流放大率 A_i 为纵轴来表示频率特性。

从此图可以了解，角频率为 ω_o，无论角频率的高低，电流放大率则都会降低。利用此特性，通过调整电容的值，使想听的广播站的频率 f(Hz) 乘以 2 ∏后等于 ω_o。由此，就可以提取想听的广播站的电波频率。



$$\omega_h=\omega_0+\frac{\omega_0}{2Q_i}$$

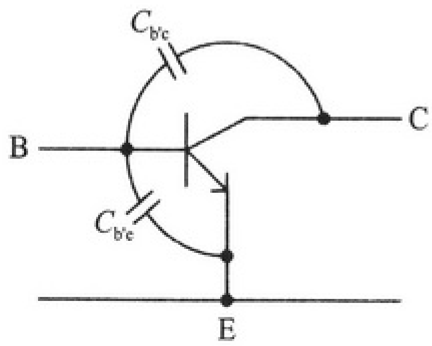
$$\omega_L=\omega_0-\frac{\omega_0}{2Q_i}$$

同时，波段为 ω_h−ω_L。这个波段与（漫画中）谱的图所显示的 $2\omega_m(2f_m)$ 相同是最理想的。

再者，关于收音机，此章所述的调谐放大电路得到的波形并不能获取声音。原因在于：从调谐放大电路获得的信号波形已经是被调制过的波形。因此，必须从获得的 AM 调制中提取声音成分。

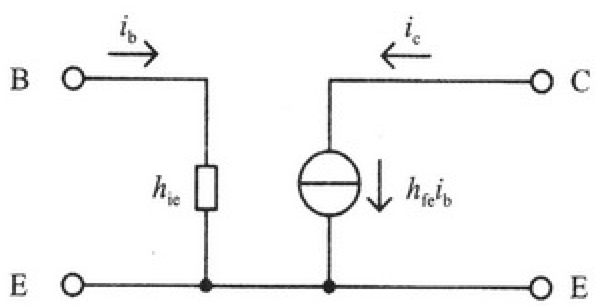
晶体管的高频等效电路

晶体管中在PN结部分会产生寄生容量。据说寄生容量在高频领域是不能忽视的。但是，如果将基极与发射极之间发生的寄生容量定为 $C_{b'c}$, 基极与集电极之间产生的寄生容量定为 $C_{b'e}$，如图 4.A2 所示。

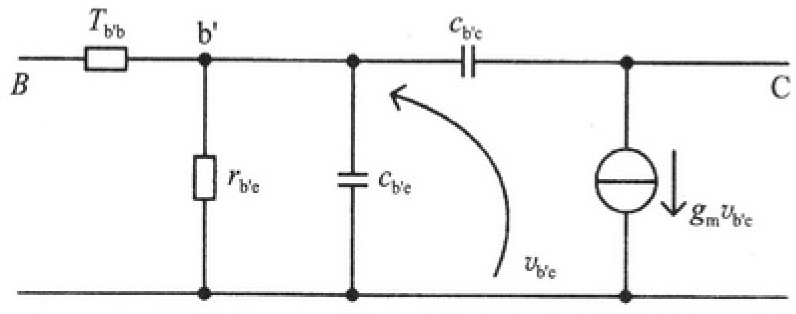


●图4.A2　晶体管中产生的寄生容量的概念

具有寄生容量的晶体管的等效电路如图 4. A3 所示，换言之，就是在化简了的等效电路（P72）的基极与发射极之间连接了 $C_{b'c}$，在基极与集电极之间连接了 $C_{b'e}$。



（a）不包含寄生容量状态下的晶体管等效电路

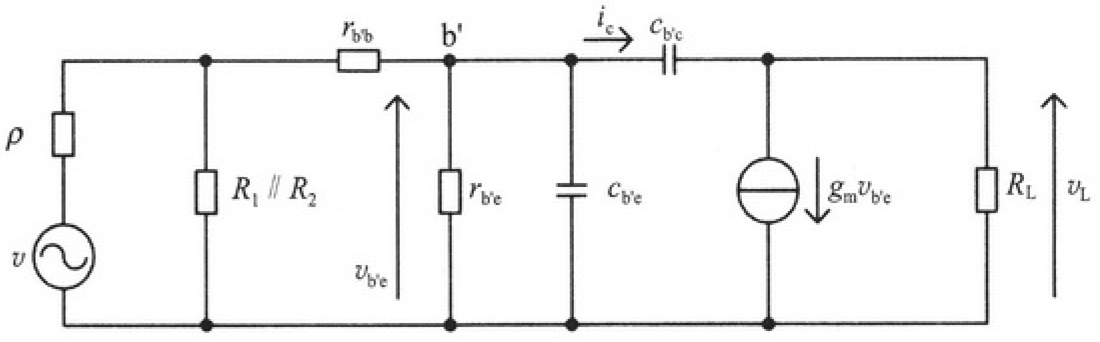


（b）包含寄生容量的晶体管等效电路

●图4.A3　具有寄生容量的晶体管等效电路

在图 4.A3 中，$r_{b'b}$ 为基极电阻，大小为 10Ω。$r_{b'e}$ 为基极与发射极之间的电阻，与 h_{ie} 意义相同。同时，为了之后的讨论更加容易，电流源 $h_{fe}\cdot i_b$ 用 $g_m\cdot v_{b'e}$ 表示，并由 $v_{b'e}$ 控制。

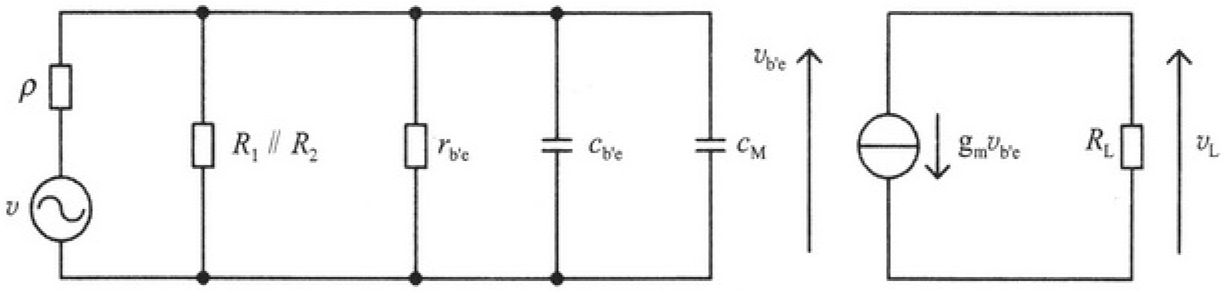
那么，来考虑如图 4.A4 所示的发射极接地放大电路的等效电路。这个电路同第 6 章讨论的等效电路是一样的。但在这里它考虑了晶体管的寄生容量。只是在第 6 章所阐述的频率只是声音频率而已，寄生容量的影响不大。



晶体管的高频等效电路

●图4. A4　根据发射极接地放大电路的交流等效电路，在晶体管中利用图4. A3的情况

在这里，重新画图使 $C_{b'c}$ 与 $C_{b'e}$ 并联。其原因在于：$C_{b'c}$ 与 $C_{b'e}$ 并联的话，合成容量可以通过各自的容量的和来表示。同时，在 h 参数等效电路中，将输入部分的 h_{ie} 与输出部分的 $h_{fe}\cdot i_b$ 进行分离如第 6 章所示可以进行简单的讨论，这时，分离为包括 $C_{b'c}$ 的左侧与 $g_m\cdot v_{b'e}$ 与 R 之间的环，这样讨论会变得简单，因此进行这样的作业就变为图 4.A5 的情况。



晶体管的高频等效电路

●图4. A5　发射极接地放大电路的交流等效电路（图4. A4的重新画图）

从图 4.A4 向图 4.A5 转换的顺序：

① 基极电阻 $r_{b'b}$ 的值比较小，可以忽略不计。

② 流动在基极与集电极之间的寄生容量 $C_{b'c}$ 中的电流如下所示，

$$i_c = j\omega c_{b'c}(v_{b'e} - v_L)$$

③ 但如果 $R_L>>1/(j\omega C_{b'c}), g_m>>j\omega C_{b'c}$，$i_c$ 流入负荷电阻则可以忽视，因此

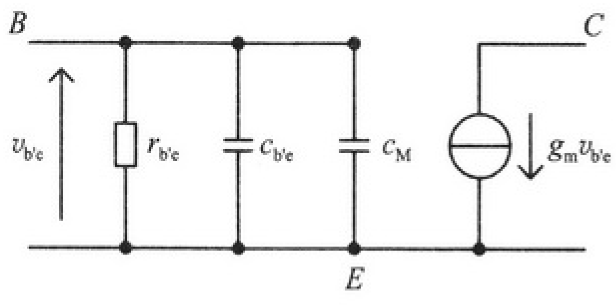
$$v_L=+g_m R_L v_{b'c}$$

④ 从以上的两个公式中可以得出 $i_c=j\omega C_{b'e}(v_{b'e}-v_L)=j\omega C_{b'e}(1+g_m R_L)v_{b'e}$，因此起因于基极与集电极之间的寄生容量的阻抗 $Z_{b'c}$ 如下所示。

$$Z_{b'c}=\frac{v_{b'e}}{i_c}=\frac{1}{j\omega C_{b'e}(1+g_m R_L)}=\frac{1}{j\omega C_M}$$

⑤ 这样，则 $C_M=C_{b'c}(1+g_m R_L)$，因此一看到基极与集电极之间的寄生容量，就会变为 $1+g_m R_L$ 倍。这被称为镜子效应，C_M 称为镜子容量。

如上所述，如图 4-A6 所示，可以导出晶体管的高频等效电路。



●图4.A6 重新画图的晶体管的高频等效电路（与图4.7相同）

阻抗的转换

在 P89 的左图中，导纳（阻抗的倒数）Y_1 为

$$Y_1=\frac{1}{r_c+j\omega L}=\frac{r-j\omega L}{r_c^2+\omega^2 L^2}$$

右图中导纳 Y_2 为

$$Y_2=\frac{1}{R_p}+\frac{1}{j\omega L_p}$$

如果 $Y_1=Y_2$ 关系成立的话，

看实部则为

$$R_p=\frac{r_c^2+\omega^2 L^2}{r_c}$$

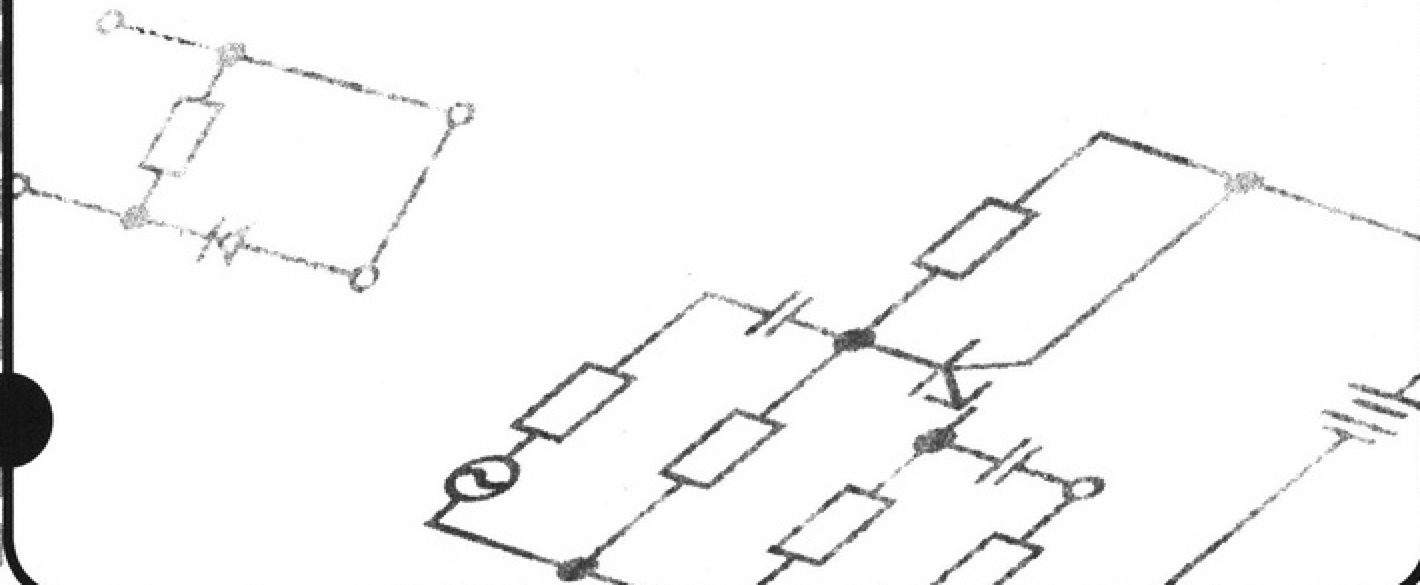
看虚部则为

$$L_p=\frac{r_c^2+\omega^2L^2}{\omega^2L}$$

因有此关系，这样就可以进行串联与并联的转换。

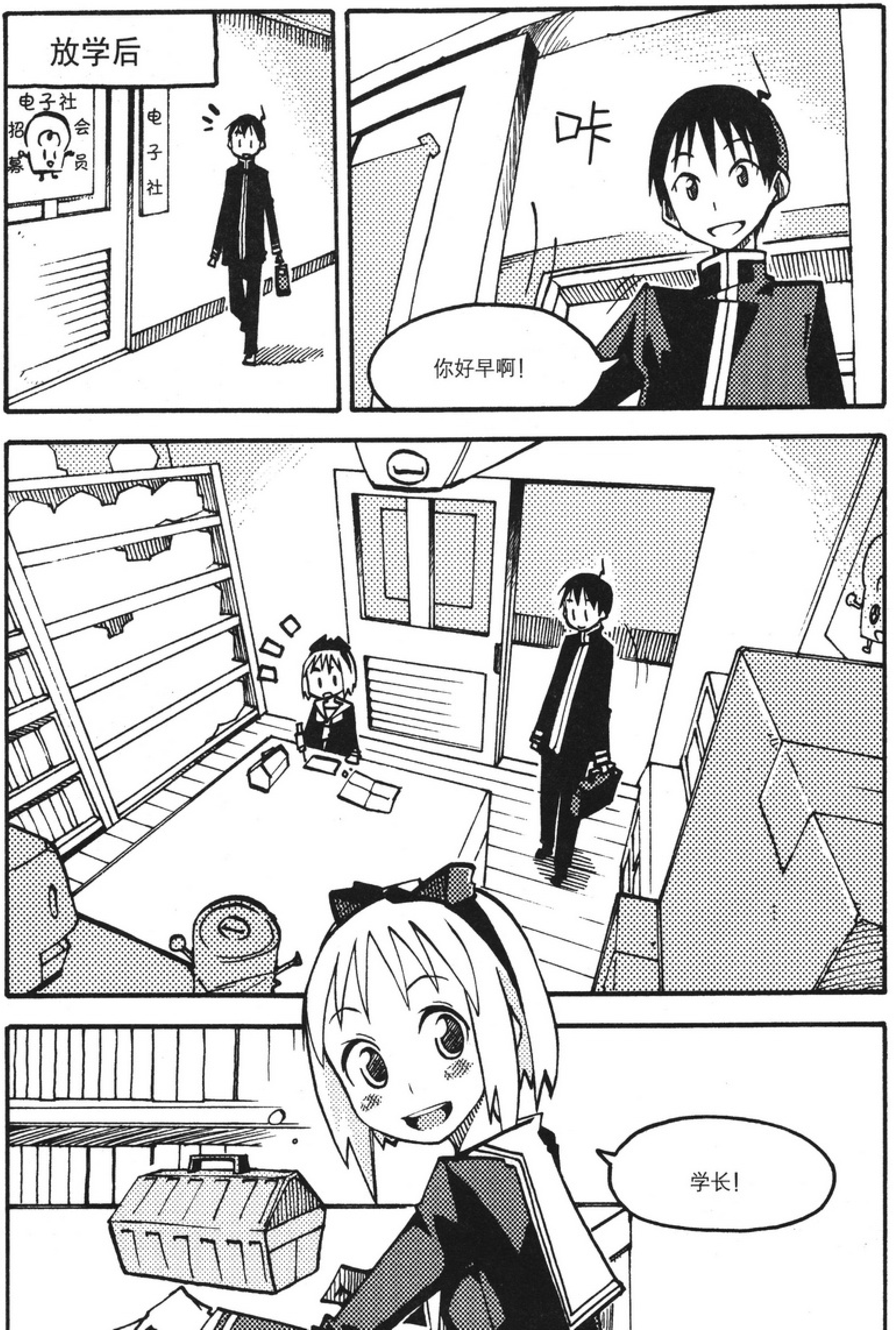
第5章

检波电路





咔
早上好
裁判社
!
小绫？
给学长的信
恋爱卿卿我我
爱情心怦怦跳
我的心情憋闷不已
会有那么一天
我的感情会如星星般闪耀吧？
温柔地爱我 ♡
学长
我
这是什么呀？



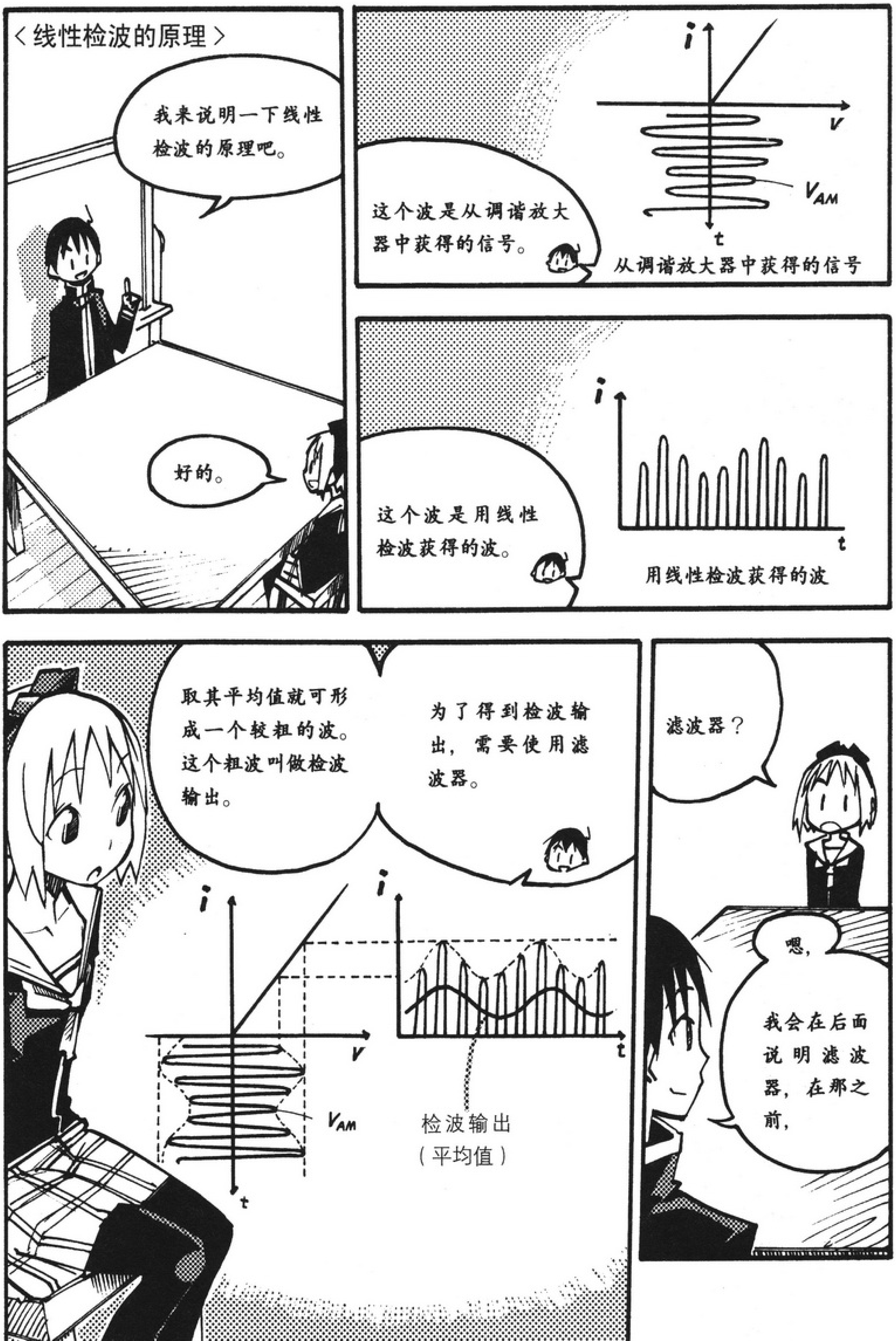
放学后
电子社
招
会
募
员
电
子
社
咔
你好早啊!
学长!

1. 检波与线性检波电路



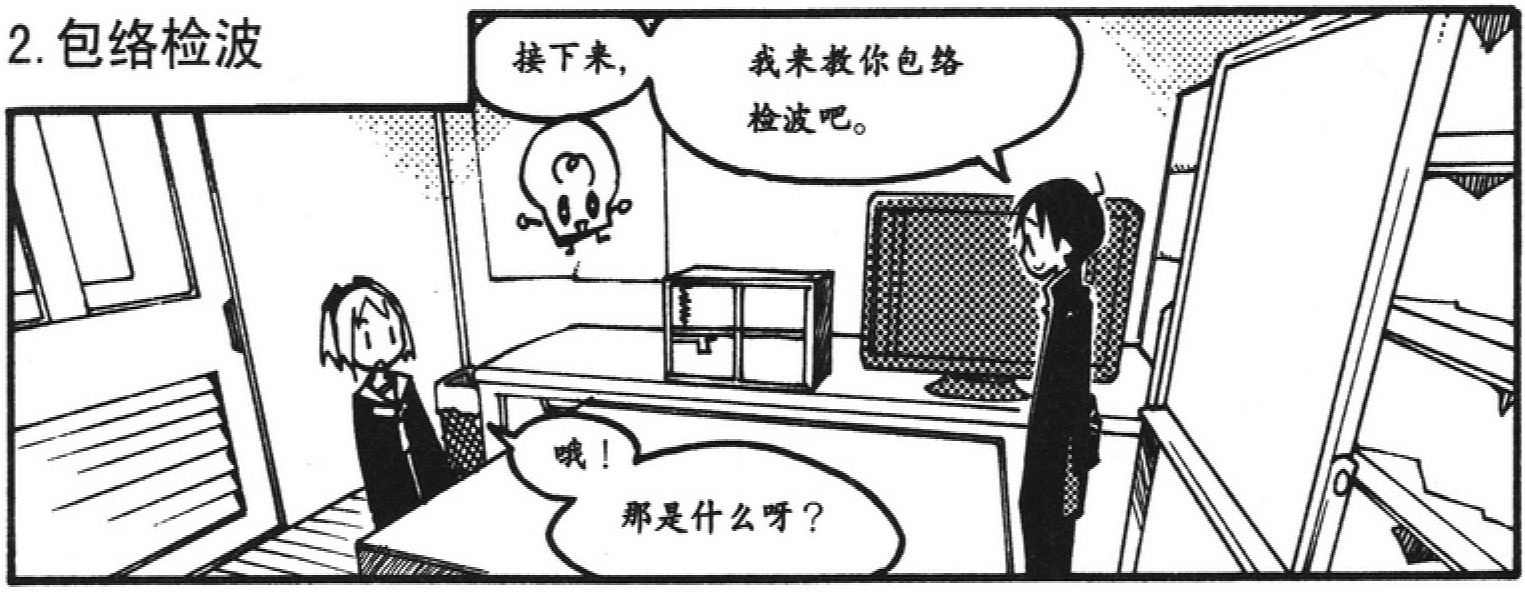
收音机的状态怎么样？
我正在努力中。
接下来我们必须学习检波电路了。
检波电路?
你用调谐放大器将想听频道的调制波放大了吧？
喜欢
提取
喜欢
喜欢
放大
是的！

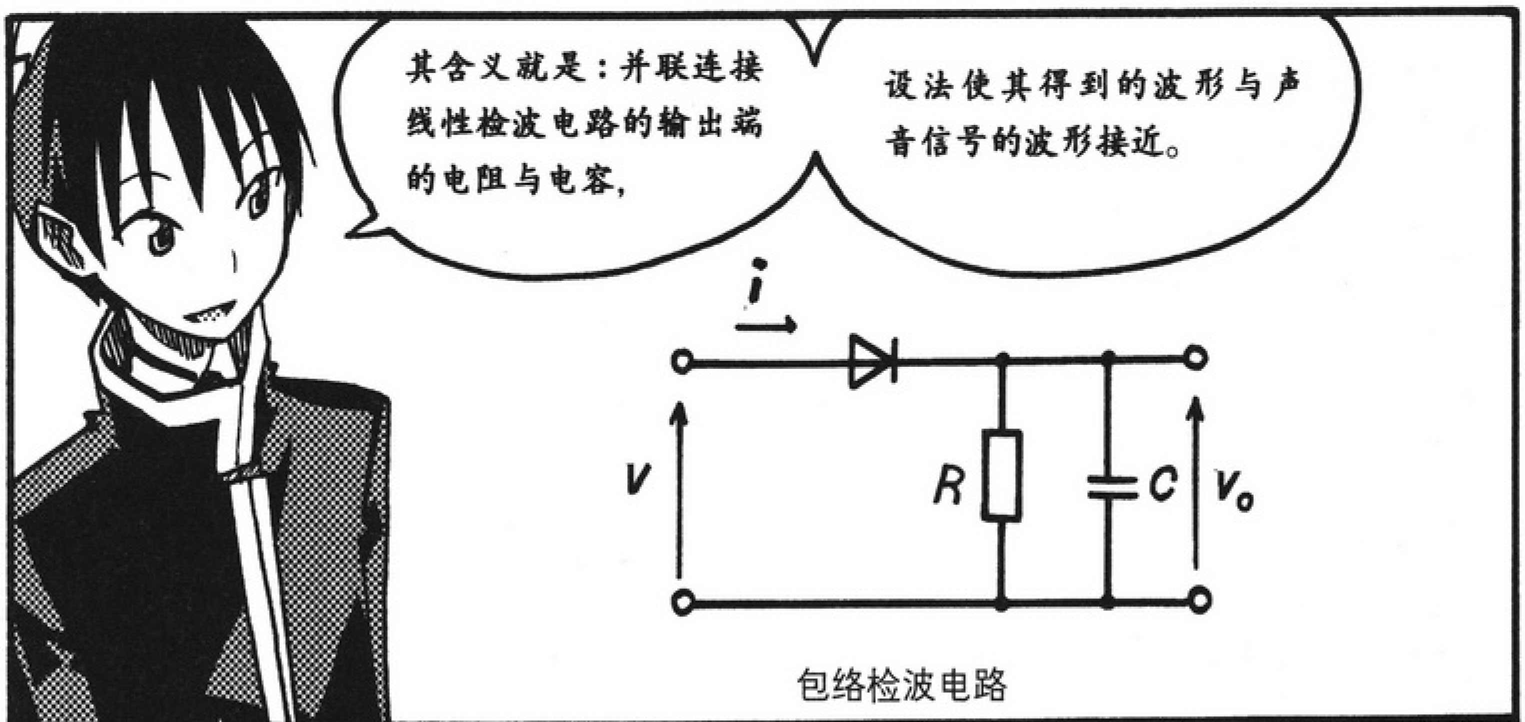

〈检　波〉
从被放大了的调制波中提取声音信号就叫做检波。
喜欢！
喜欢！
如果不做这个检波操作，就不能听到声音。
那怎么进行检波呢？
〈线性检波电路〉
使用线性检波电路将对 AM 调制波进行检波。
i
V
R
线性检波电路
左侧为输入，右侧为输出，对吧？


〈线性检波的原理〉
我来说明一下线性检波的原理吧。
好的。
这个波是从调谐放大器中获得的信号。
i
v
V_{AM}
t
从调谐放大器中获得的信号
这个波是用线性检波获得的波。
i
t
用线性检波获得的波
取其平均值就可形成一个较粗的波。这个粗波叫做检波输出。
为了得到检波输出，需要使用滤波器。
i
v
V_{AM}
t
i
t
检波输出
（平均值）
滤波器？
嗯，
我会在后面说明滤波器，在那之前，

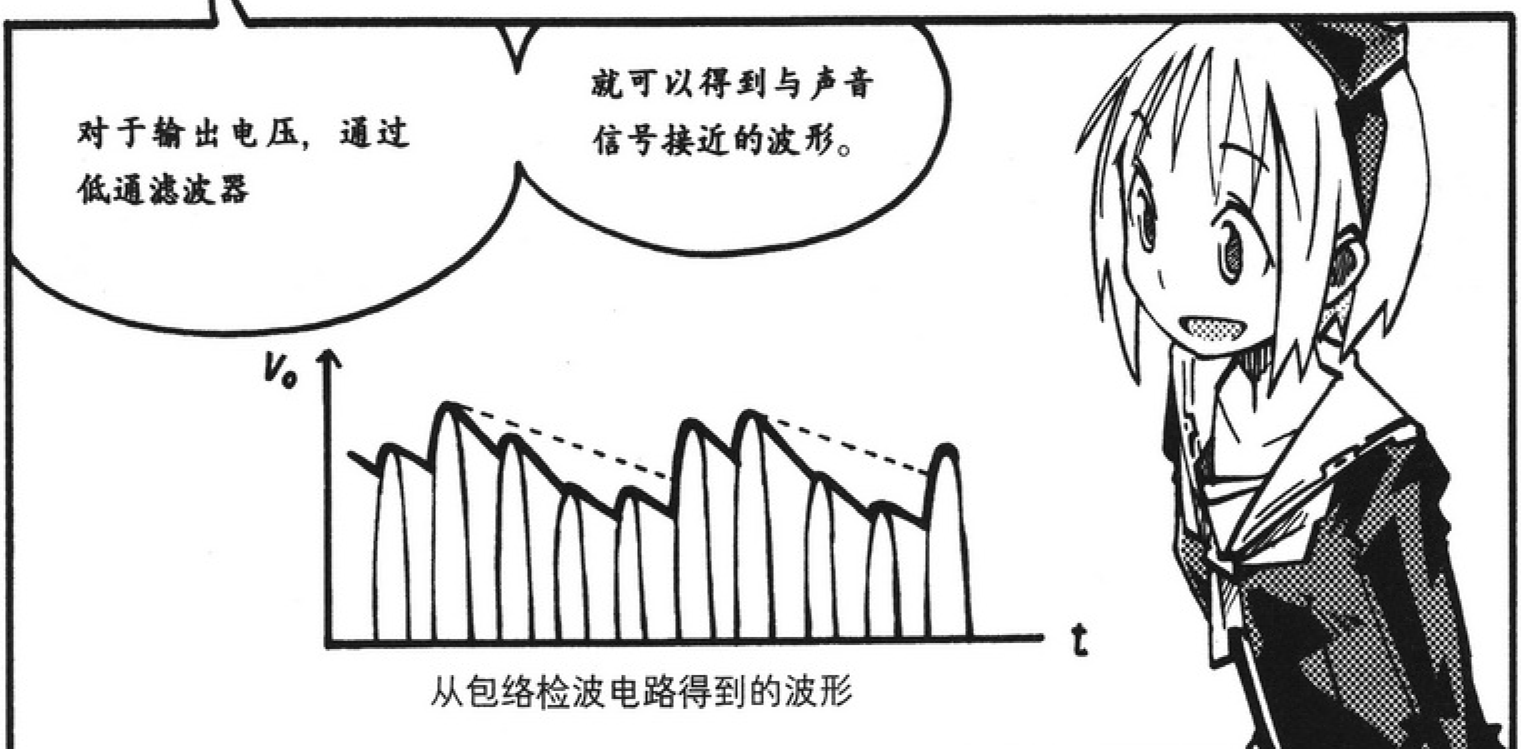

你不认为这个原理与某个相似吗？
嗯，
整流电路！
是的，
如将从调谐放大器中获得的信号输入检波电路
只有正向电流才会在输出部分出现。
t
+
0
-
检波电路
t
+
0
-
如果是这样的状态，作为输送波的高频部分就会过滤，对吧。
你好像已经明白了啊！
太好了！？——
因此，
只要得到整流后的波形的平均值就可以了。

2. 包络检波





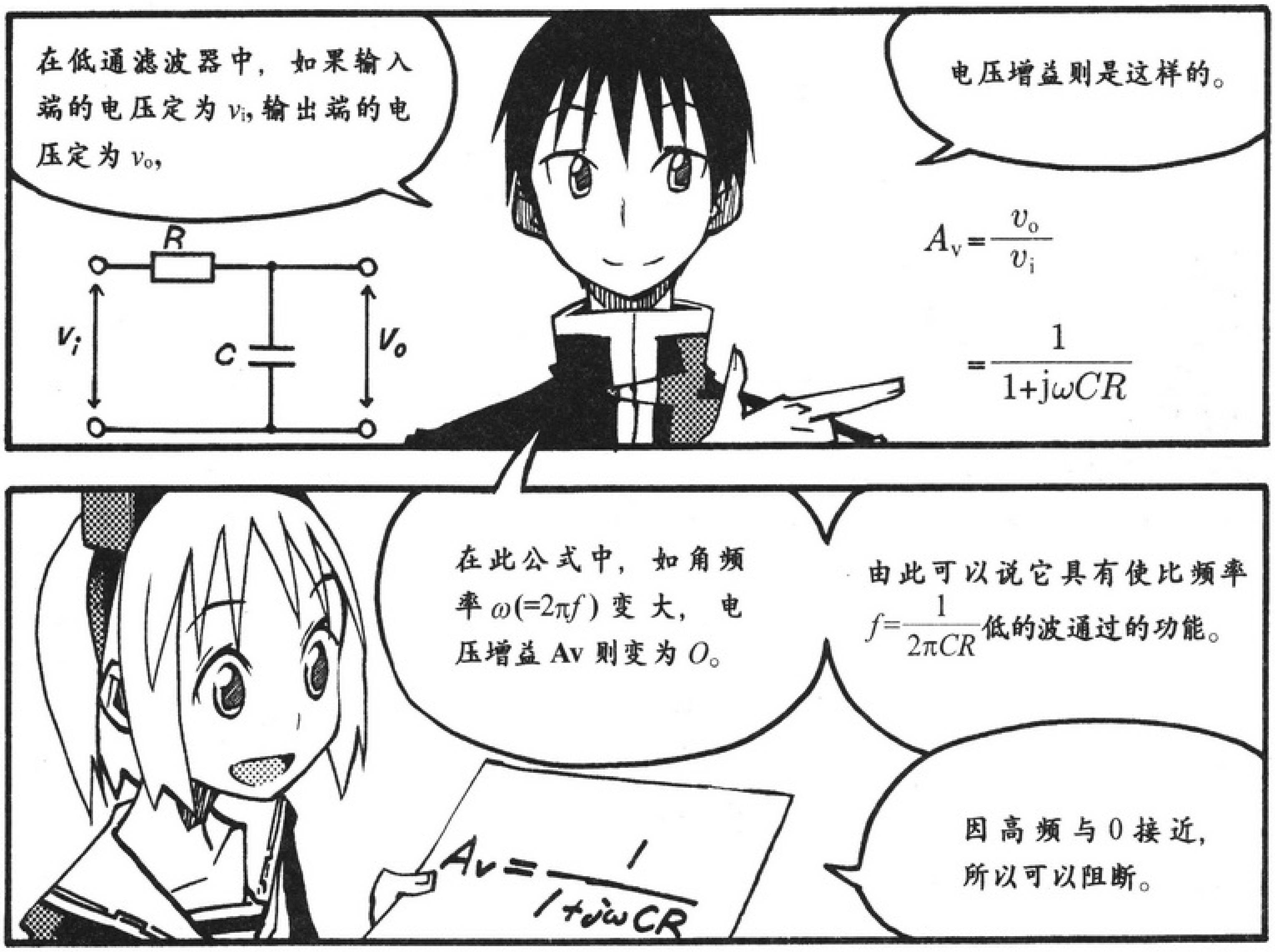
包络检波电路



从包络检波电路得到的波形

3. 滤波器

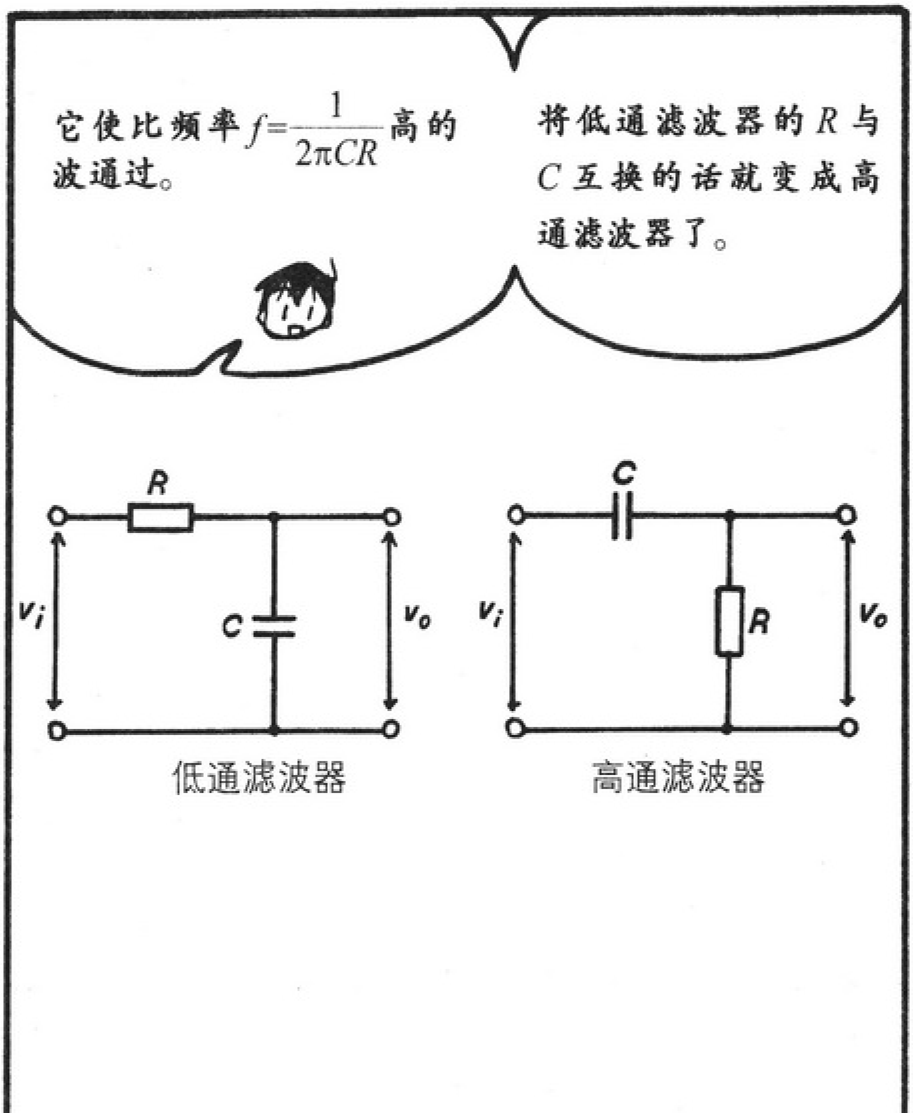

那么，
我们来说说滤波器吧。
在这里，所谓滤波器是只让必要的信号成分通过，其他都要将其阻断。
是的。
滤波器中有高通滤波器与低通滤波器两种。
首先，我们先来看一下低通滤波器吧。
拜托了。
〈低通滤波器〉
所谓低通滤波器是指只有频率低的部分通过的滤波器。
R
C
V_i
V_o
低通滤波器（LPF）



在低通滤波器中，如果输入端的电压定为 v_i，输出端的电压定为 v_o，
电压增益则是这样的。
R
v_i
C
v_o
$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{1}{1+j\omega CR}$
在此公式中，如角频率 $\omega(=2\pi f)$ 变大，电压增益 Av 则变为 O。
由此可以说它具有使比频率 $f=\frac{1}{2\pi CR}$ 低的波通过的功能。
因高频与 0 接近，所以可以阻断。
$Av = \frac{1}{1+j\omega CR}$



〈高通滤波器〉
那么，高通滤波器是怎么样的呀？
你可以认为它与低通滤波器相反。



它使比频率 $f=\frac{1}{2\pi CR}$ 高的波通过。
将低通滤波器的 R 与 C 互换的话就变成高通滤波器了。
R
v_i
C
v_o
低通滤波器
C
v_i
R
v_o
高通滤波器


原来如此啊，
我明白了。
通过将滤波器连接到线性检波电路的输出端就可以得出耳朵能听到的声音信号。
收音机马上就要接近完成了呢。
是啊！
对了！
小绫，今天早上的信是什么意思啊？
？
唉？！


我是学理科的，我不太了解文学的东西。
那，那是……
就是这个意思！！
唉？！
哐
啊？
小绫，
这让我很为难。


朋友之间做这样的事情，很奇怪啊……
奇怪？！
我不正常吗？
不是那样的，我只是感觉有些怪怪的。
我是变态吗？
不，不是那样的。
啊


我被甩了！
呀
呀
算了。
哇啊啊啊啊
等一下……
小绫！！？这样的你，我可有点不太喜欢。
哗
啦



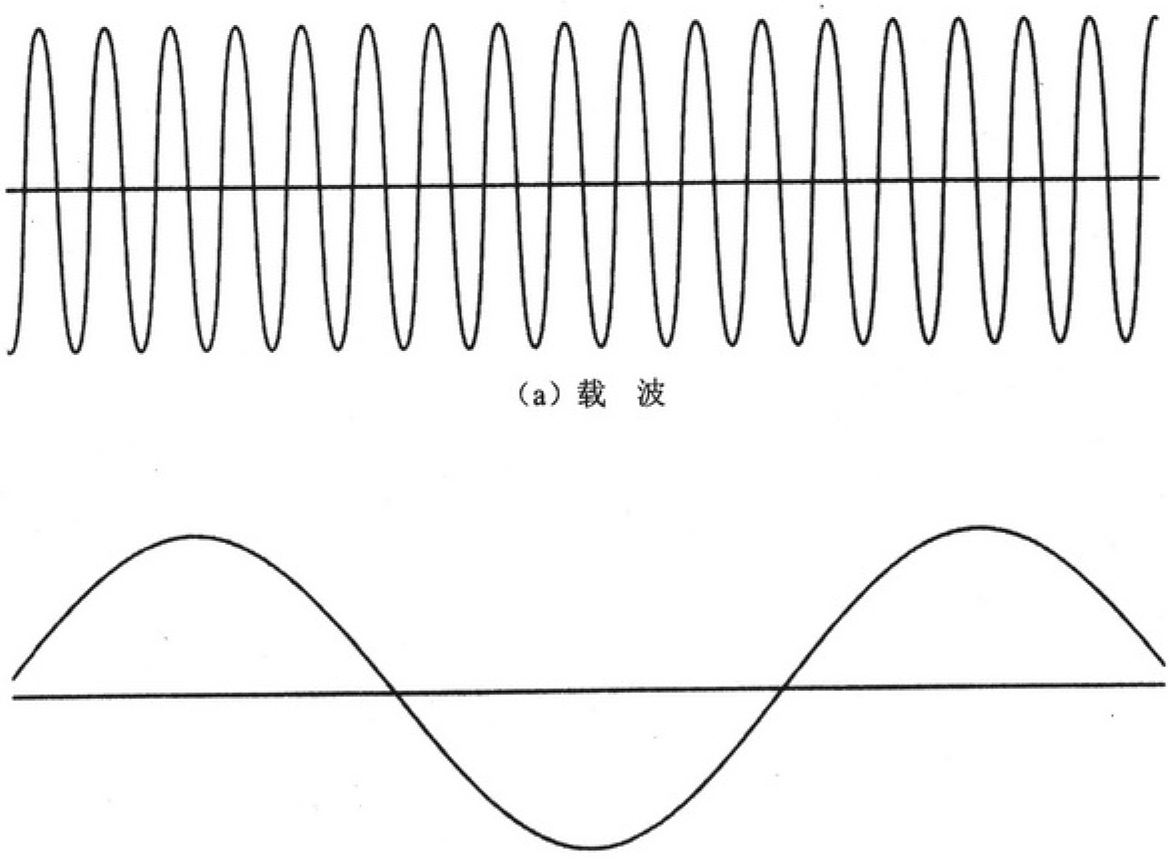
你这是在
干什么？
呜
哇啊啊啊啊啊啊啊啊啊啊啊啊啊啊啊啊啊

补充知识

关于 FM(频率调制)

本书中所述的收音机使用的是 AM（振幅调制）。在这里针对另一个广泛应用的 FM（频率调制）进行说明。

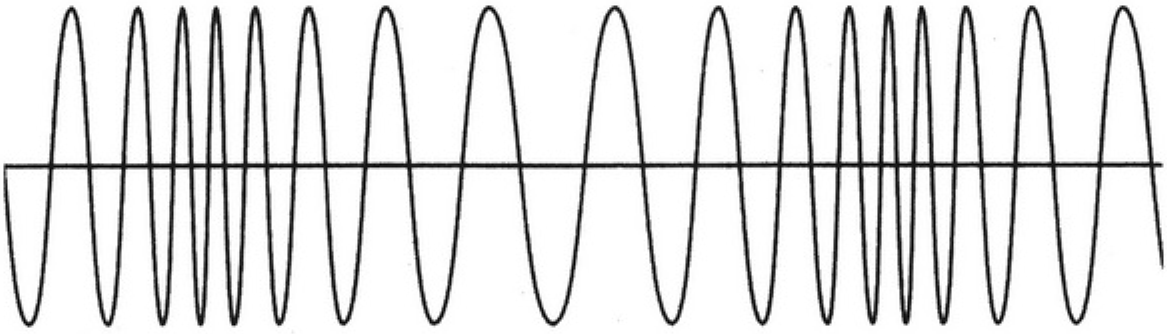
所谓频率调制是指在 FM 广播的情况，对于 76.0~90.0MHz 的载波，根据信号的大小，发信电波的频率也会相应发生变化。换言之，FM 调制波是以输送频率（由广播站决定，如果是 NHK-FM，在东京为 82.5MHz）为中心，根据信号的大小，波的疏密程度会相应发生变化（频率变高或者变低）的方式。



(a) 载　波

(b) 信　号

●图5.A1　频率调制的原理



（c）FM调制波

●图5.A1（续）

这样，FM 调制波就是振幅一定、频率会时时刻刻变化。即使将噪音重叠在 FM 调制波上，只要了解频率的疏密程度就可以进行检波，所以可以说它对噪音是有抵抗力的。同时，FM 的情况时，因与邻接频道的关系可以取得 100kHz 的波段范围，所以它可以覆盖声音信号的频率波段。因此，与 AM 相比较而言，FM 可以说适合音乐的播放，因为它不受噪音的影响且频率波段范围较大。

FM 调制与 LC 振荡器，根据信号来相应变化 L（线圈的电感值）或者 C（电容的容量值）就可进行调制。无线传声器等，就是利用可变容量二极管来变化 C 的值进行 FM 调制的。

第6章

低频放大电路




从那以后一周过去了。
……
您拨打的电话无法接通。
那天以来，她不再来参加社团活动了。
小绫是不打算再来了吗？
回家吧……



你在干什么!!?
是我不对，突然发脾气并大声斥责她。
啊啊啊啊
当时我为什么会失去理智呢?
她也不接我的电话……
咦
啊，怎么没有？
难道是落在社团室了？！
电子社招募会员
电子社
?


这么晚了，是谁呀？
!!
小绫！
等一下！
怎么回事？这么晚了，怎么一个人在这里？


做收音机……
收音机？
与学长的记忆中的收音机，
无论如何我都想将它完成。
我很开心！
唉？
小绫的热心果然是真的。
哪，哪里……

1. 低频放大电路的概念


为了完成收音机的制作，需要理解低频放大电路。
学长，那个，能教我吗？
当然，我很愿意协助你。
为了从收音机中播放出声音，必须向扩音器输送交流信号。
但如果交流信号很弱，则声音很小就会听不到。
Before
交流信号
扩音器
啊
是的。
After
放大电路
扩音器
啊
将交流信号增大的正是放大电路。


〈3 个类型的放大电路〉
低频放大电路有3个类型。
1. 基极接地放大电路
2. 发射极接地放大电路
3. 集电极接地放大电路
它们不同在哪里？
接地的地方不同。
基极接地放大电路
发射极接地放大电路
集电极接地放大电路
哦！
信号的放大程度不同。
其中，
通过将发射极接地放大电路与集电极接地放大电路两个组合起来就可以使收音机发出声音。
好的。
现在，我来说明一下这两个吧。

2. 发射极接地放大电路



R_1
R_C
C_1
C_C
V_{CC}
ρ
R_2
V_1
V_2
R_3
V_i
R_E
C_E
●图 6.1 发射极接地放大电路
这就是发射极接地放大电路。
如使用此电路，输出电流会变为输入电流的 100 倍。
太厉害了！100 倍！！
哈
看似，只要这样就可以获得充分的放大作用。但是……
怎么会……这不对吗？
乐极生悲！？
实际上，由于输出阻抗较大，
即使这样连接到扩音器也不会发出声音。
……
哈
扩音器
发射极接地放大电路
哎呀！

2.1 等效电路



先求得等效电路，
求得电流放大率和输出阻抗来说明发不出声音的原因吧。
唉？
等效电路是什么啊？
等效电路，
就是指将晶体管替换到电阻(R)、线圈(L)、电容(C)和电源上，改画成像电气电路一样的电路。
B
C
E
i_b
i_c
V_{be}
V_{ce}
h_{ie}
$h_{re}V_{ce}$
$h_{fe}i_b$
$\frac{1}{h_{oe}}$
为什么要特意那么做呢？
加入晶体管进行电路分析，这是解决此问题的方法。

2.2 偏压电路

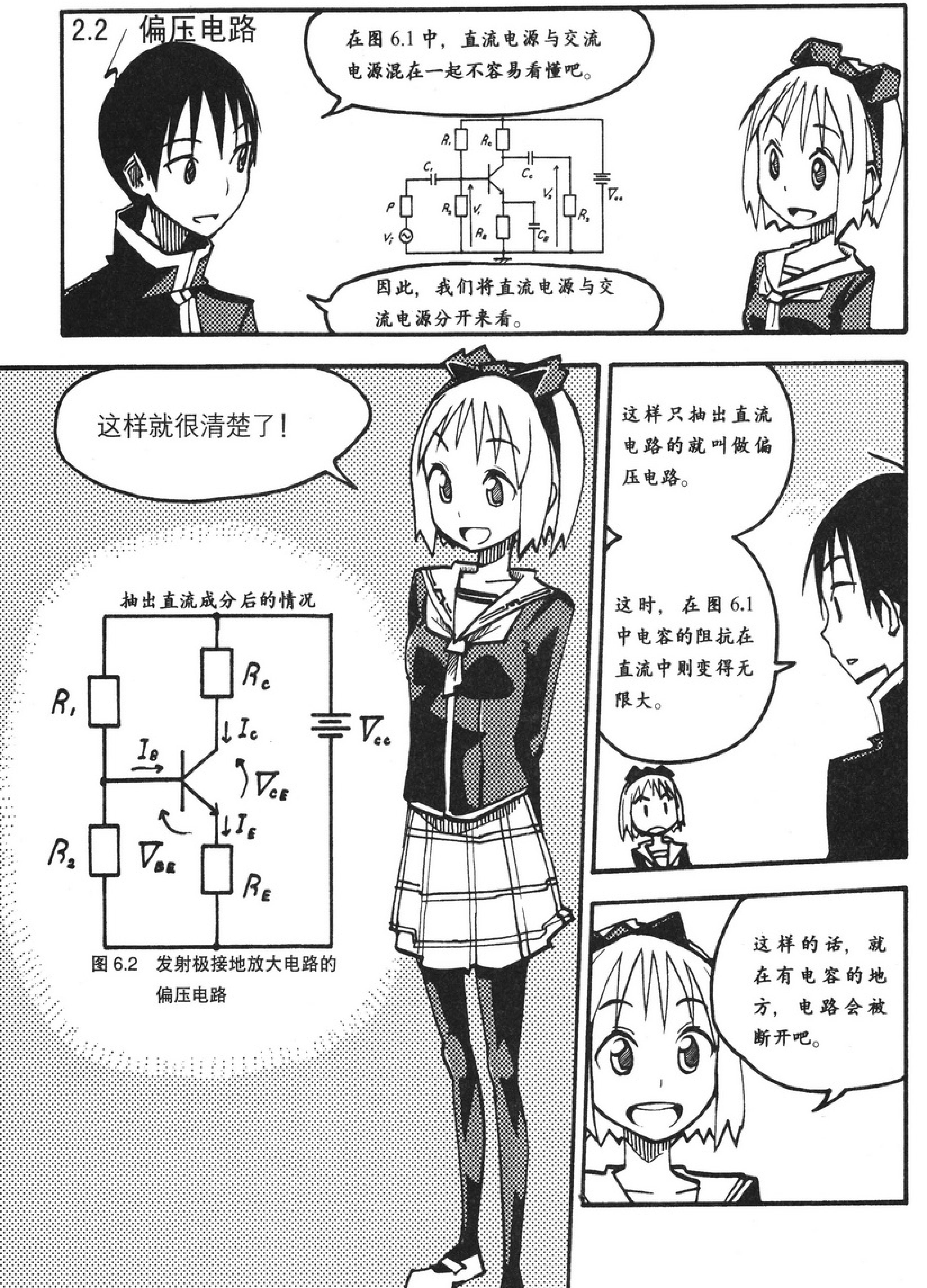


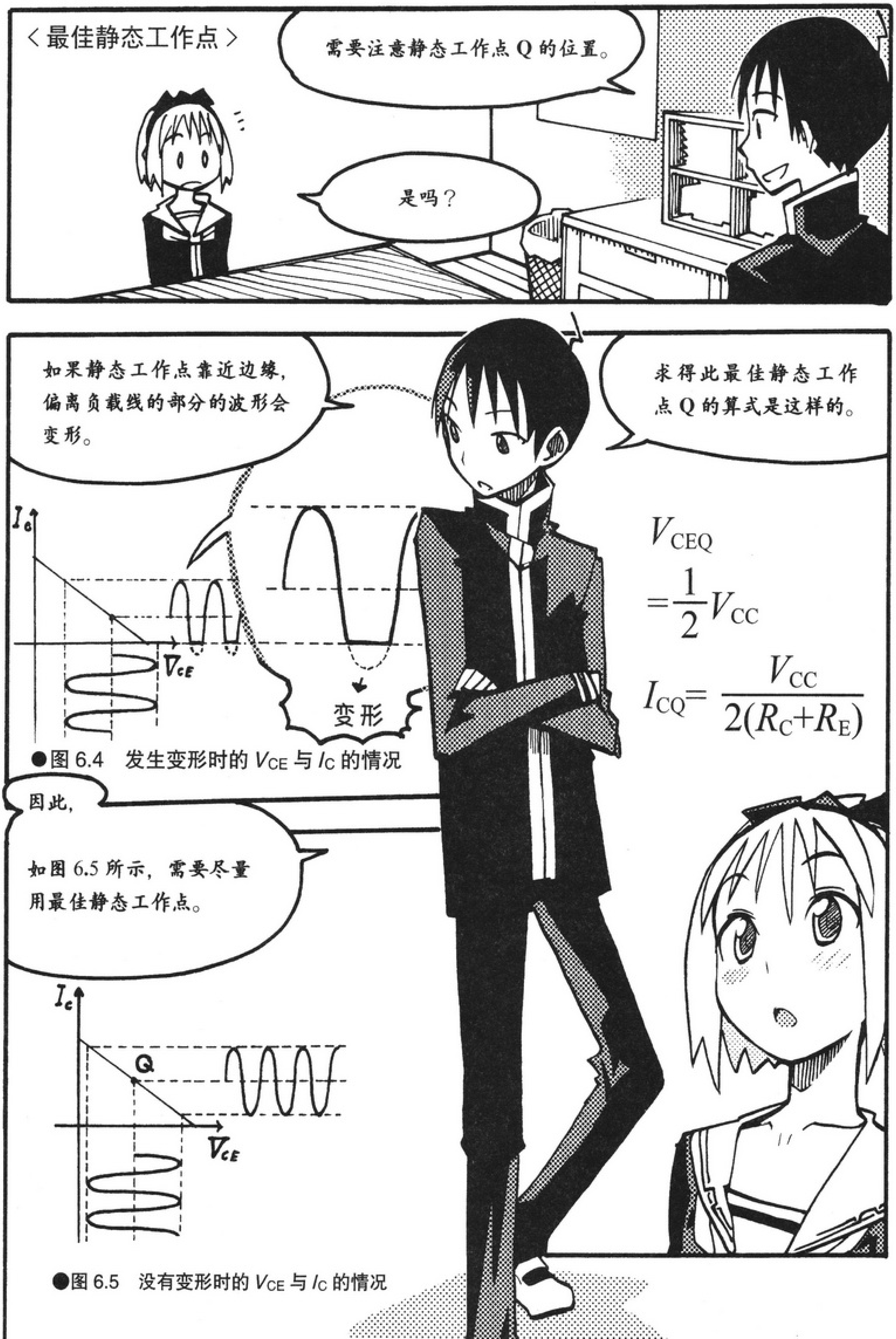
图 6.2　发射极接地放大电路的偏压电路


看这偏压电路（图 6.2）只有 1 个直流电源吧。
R_1
R_2
R_C
R_E
I_B
I_C
I_E
V_{BE}
V_{CE}
V_{CC}
是的。
因此，
用 R_1 与 R_2 将直流电源电压 V_{CC} 分压，晶体管则总是 ON 的状态。
在这里如果利用基尔霍夫定律。
$V_{CC}=R_CI_C+V_{CE}+R_EI_E$
则是这样的。
另外，假设流入集电极的电子几乎都会流入发射极，则 $I_C \approx I_E$。
$V_{CC}=V_{CE}+(R_C+R_E)I_C$
则会是这样吧。



<何为静态工作点>
刚才的公式 $V_{CC}=V_{CE}+(R_C+R_E)I_C$ 中，
如图 6.3 所示的是以 V_{ce} 为横轴、I_c 为纵轴的一次函数的直流负载线。
I_c
直线负载线
$\frac{V_{CE}}{R_C+R_B}$
静态工作点
晶体管的特性
I_{CQ}
Q
O
V_{CEQ}
V_{CC}
V_{CE}
此图中，晶体管中的 V_{ce} 与 I_c 的特性曲线相配合所显示的 2 线的交点就叫做静态工作点。
图中有 5 个呢。
I_c
O
V_{ce}
以这个静态工作点为中心。
在基极电流上
将交流信号
重　叠
t
(a) 基极电流
t
(b) 交流信号
t
(c) 重叠后的情况
这样做就可以起到放大的作用。
原来如此啊。

图 6.3　直流负载线



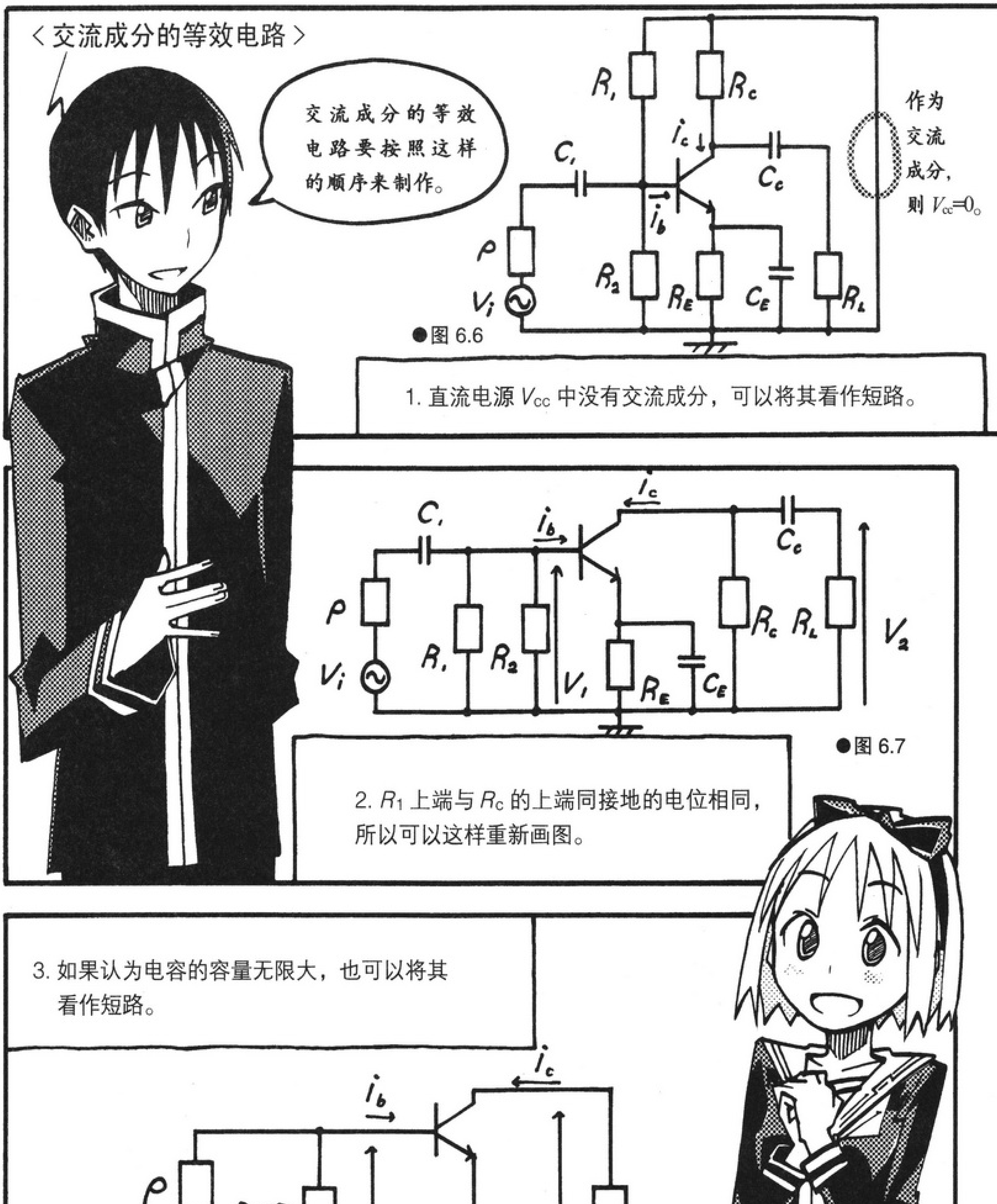
●图 6.4　发生变形时的 V_{CE} 与 I_C 的情况

●图 6.5　没有变形时的 V_{CE} 与 I_C 的情况

2.3 交流放大电路



这样分析直流成分，
并考虑如何使用偏压较好。
嗯……嗯。
直流之后，我们来想一下交流成分吧。
好的。
为此，需要得出交流等效电路。
同时要分解图 6.1 吧。
是的，
那样可得出电流放大率与输出阻抗。
R₁
Rc
Cc
P
R₂
V₁
V₂
Vᵢ
R_E
C_E
Vcc


<交流成分的等效电路>
交流成分的等效电路要按照这样的顺序来制作。
R_1 R_C i_C C_1 C_C i_b ρ V_i R_2 R_E C_E R_L
作为交流成分，则 $V_{CC}=0$。
●图 6.6
1. 直流电源 V_{CC} 中没有交流成分，可以将其看作短路。
i_C C_1 i_b C_C ρ R_1 R_2 V_i V_1 R_E C_E R_C R_L V_2
●图 6.7
2. R_1 上端与 R_C 的上端同接地的电位相同，所以可以这样重新画图。
3. 如果认为电容的容量无限大，也可以将其看作短路。
i_C i_b ρ $R_1/\!/R_2$ V_1 V_2 $R_C/\!/R_L$ V_i
●图 6.8



●图 6.9 发射极接地放大电路的交流等效电路

2.4 电流放大率


下面我来说明一下电流放大率。
？
那是什么呀？
电流放大率 A_i 表示的是输出电流 i_L 为输入电流 i_i 的几倍。
$i_L = A_i i_i$
输出电流
电流放大率
输入电流
如果 A_i 为 1 以上，
$i_L = A_i i_i$
那么输出比输入大。
是的，就是说，A_i>1 时，就可以说电流被放大了。
太棒了！



我现在来讲解它的原理。
但为此，必须从图 69 的交流等效电路中得出输入电流 i_i 与输出电流 i_L 的关系。
啊！
电流放大率 A_i 用输入电流 I_i 与输出电流 i_L 之比来表示。
$A_i=\frac{i_L}{i_i}=\frac{i_b}{i_i}\cdot\frac{i_c}{i_b}\cdot\frac{i_L}{i_c}$
与 h_{ie} 中流动的电流相比，$R_1//R_2$ 中流动的电流是非常小的。
i_i
h_{ie}
i_c
i_L
V_1
V_2
i_b
P
V_i
$R_1//R_2$
$h_{fe}i_b$
$R_c//R_L$
同时，
一般来说，$R_1//R_2$ 为几千欧[姆]，而 h_{ie} 为几十欧[姆]，所以从电源 V 流出的电流几乎都会流入 h_{ie}。
于是，因为
$i_i=i_b$
$i_L=-i_c$
$=-h_{fe}\cdot i_b$
则 $A_i=-h_{fe}$
……
而且 h_{fe} 为
$h_{fe}=\beta=\frac{\alpha}{1-\alpha}$
可以这样计算。


〈基极接地流放大率〉
这里说的α是基极接地电流放大系数，大体上晶体管都取值为 0.95＜α＜1.0。
无限接近 1 是吧！
例如代入 α=0.99 的数值，A_i 为……
喂，喂
$A_i=\frac{0.99}{1-0.99}$
$A_i=-99$
嗯！
由此，可以说负荷电流 i_L 是输入电流 i_i 的大约 100 倍。
原来如此！所以是 100 倍啊。


<相位的反转>
因为输出电流比输入电流大，所以可以说具备放大作用。
知道了。
……
但仔细看的话，电流放大率 A_i 的值却是负的！！?我真是不明白！！
其实，
A_i 为负是因为输入信号与相位是反转的。
i
i_i
t
i_L
学长与我的相位不也是反转的吗？
嗯
小绫，你在做什么？

●图 6.10　相位的反转


2.5 输入输出的阻抗(1)
发射极接地放大电路的内容结束后，我来说一下阻抗的内容吧。
噢耶！
又来了，阻抗！
<输入阻抗 Zin(1)>
首先，输入阻抗 Zin 是从输入一侧来看的，因此只需注视图 6.9 的左半部分。
公式是这样的。
Zin=R1//R2//hie
为什么不包含ρ呢？
ρ是输入信号源 vi 的内部电阻，vi 与ρ可作为一体考虑，所以不包含ρ。



<输出阻抗 Zout (1)>
接着，我们来看输出阻抗 Zout 吧。
是这样的吗？
哈哈哈♥
Zout 为在输入信号 Vi 的值为 0 时，从输出端子 RL 来看的阻抗。
这时，Vi 的值为 0，所以 ib=0。
那样的话，从输出端来看的话，电流则是不会流动的。
ii
hie
ic
iL
Vi
ib
Vout
P
Vi
R1//R2
hfeib
Rc//RL
公式是这样的。
电流源 −hfeib=0(=ic)
Zout= vout / −ic | vi=0 → ∞
这样，输入阻抗如显示为非常大的值，即使连接扩音器也不会发出声音。
唉？为什么？

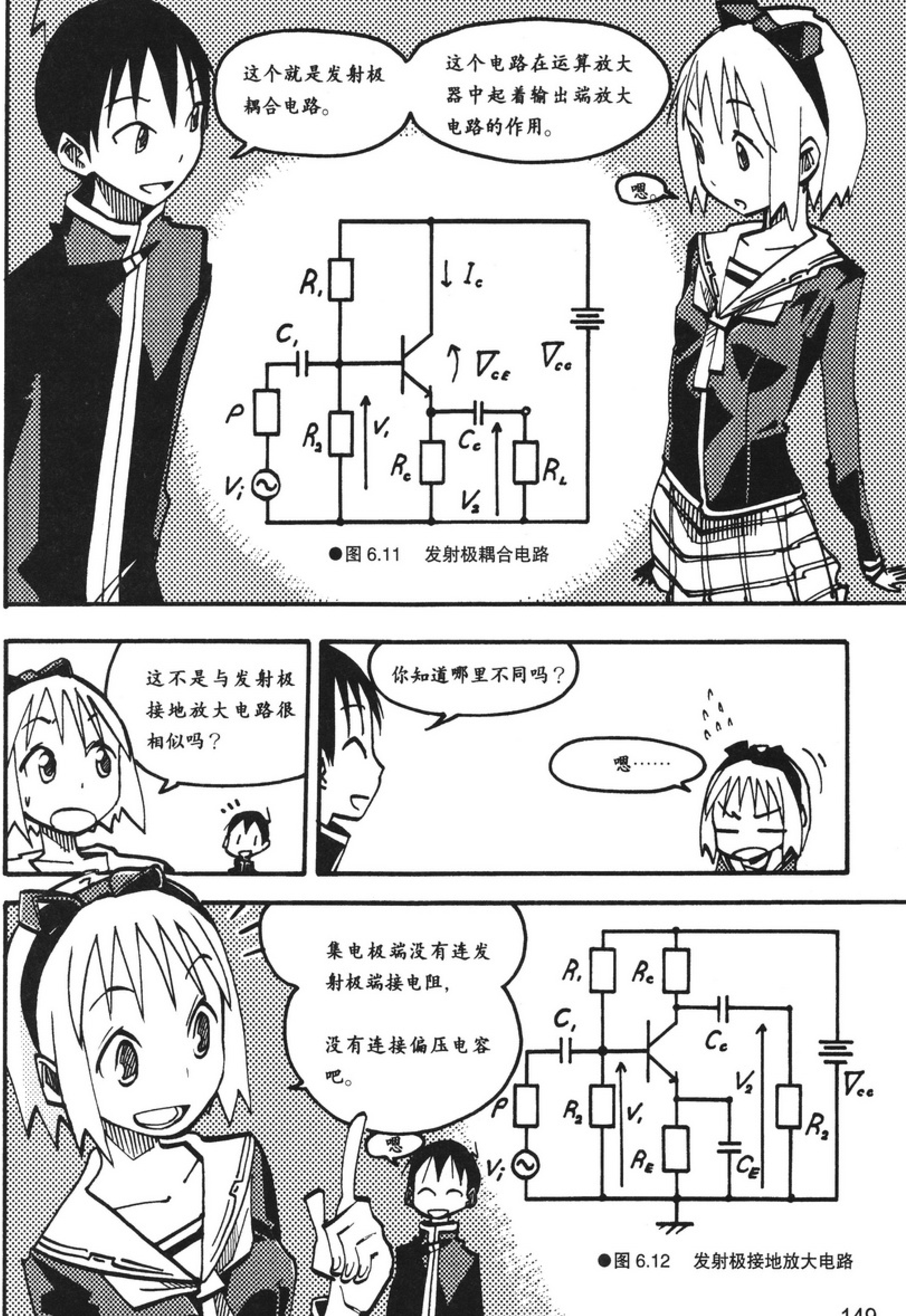


扩音器的阻抗非常小，只有8Ω，所以如果是很大的输出阻抗，其大部分的能量就都被消耗了。
呼呼……
扩音器
那扩音器也很辛苦啊！
为了解决这个问题……
啊！
必须将输入阻抗大而输出阻抗小的较小的放大电路
插入发射极接地放大电路与扩音器之间。
噢耶
好帅！

3. 集电极接地放大电路

3.1 发射极耦合电路

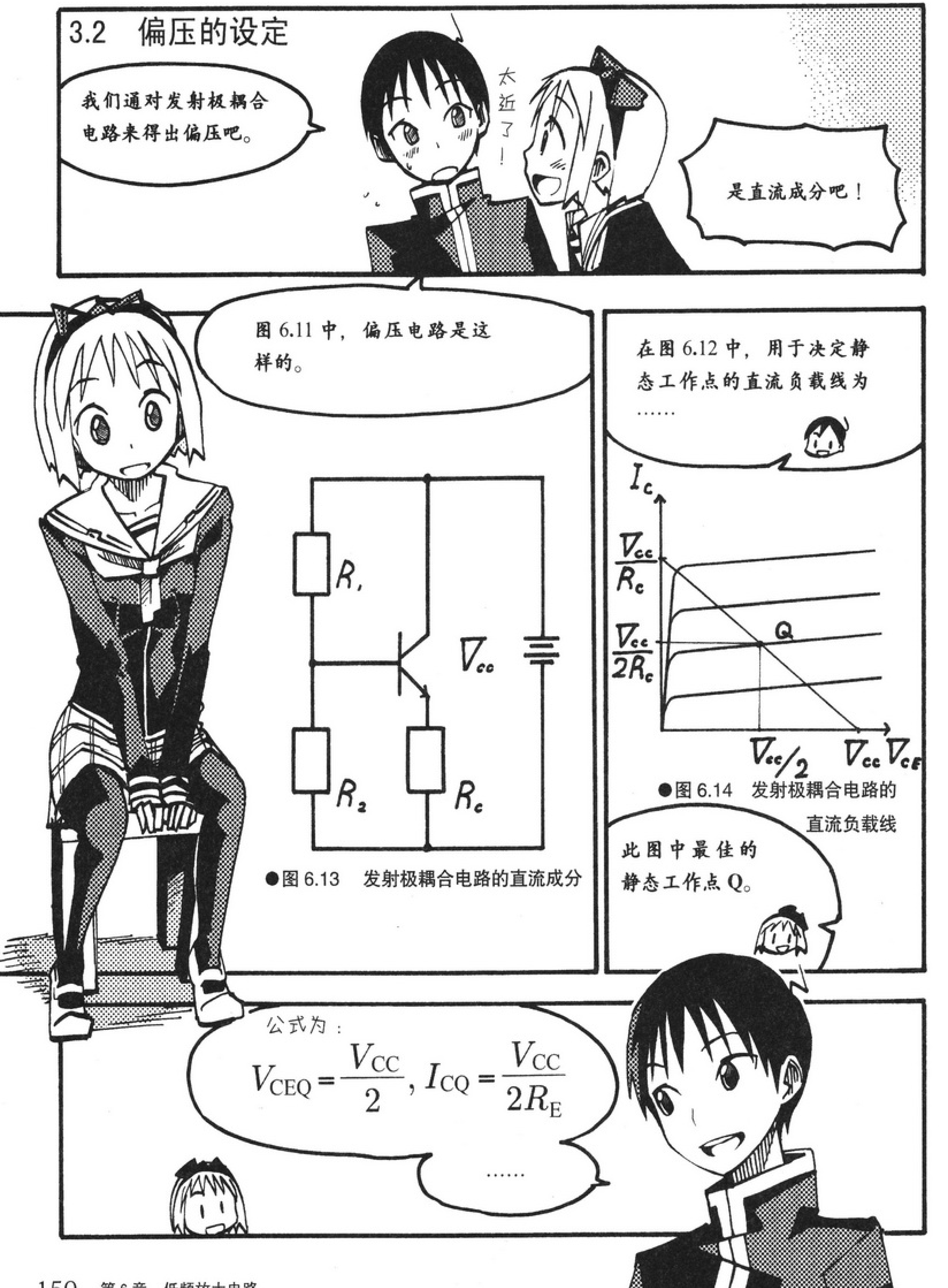




●图 6.11　发射极耦合电路

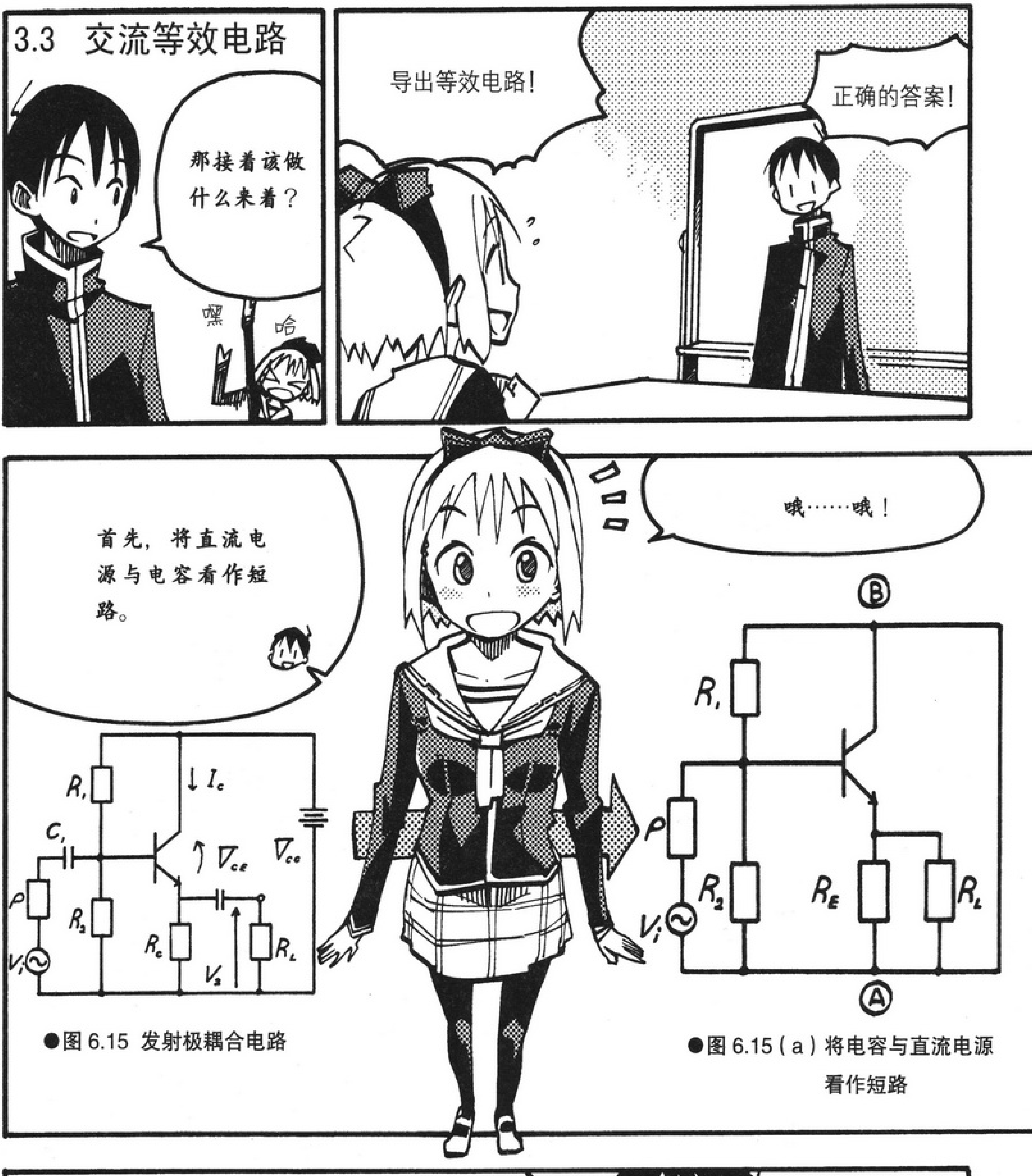
●图 6.12　发射极接地放大电路

3.2 偏压的设定



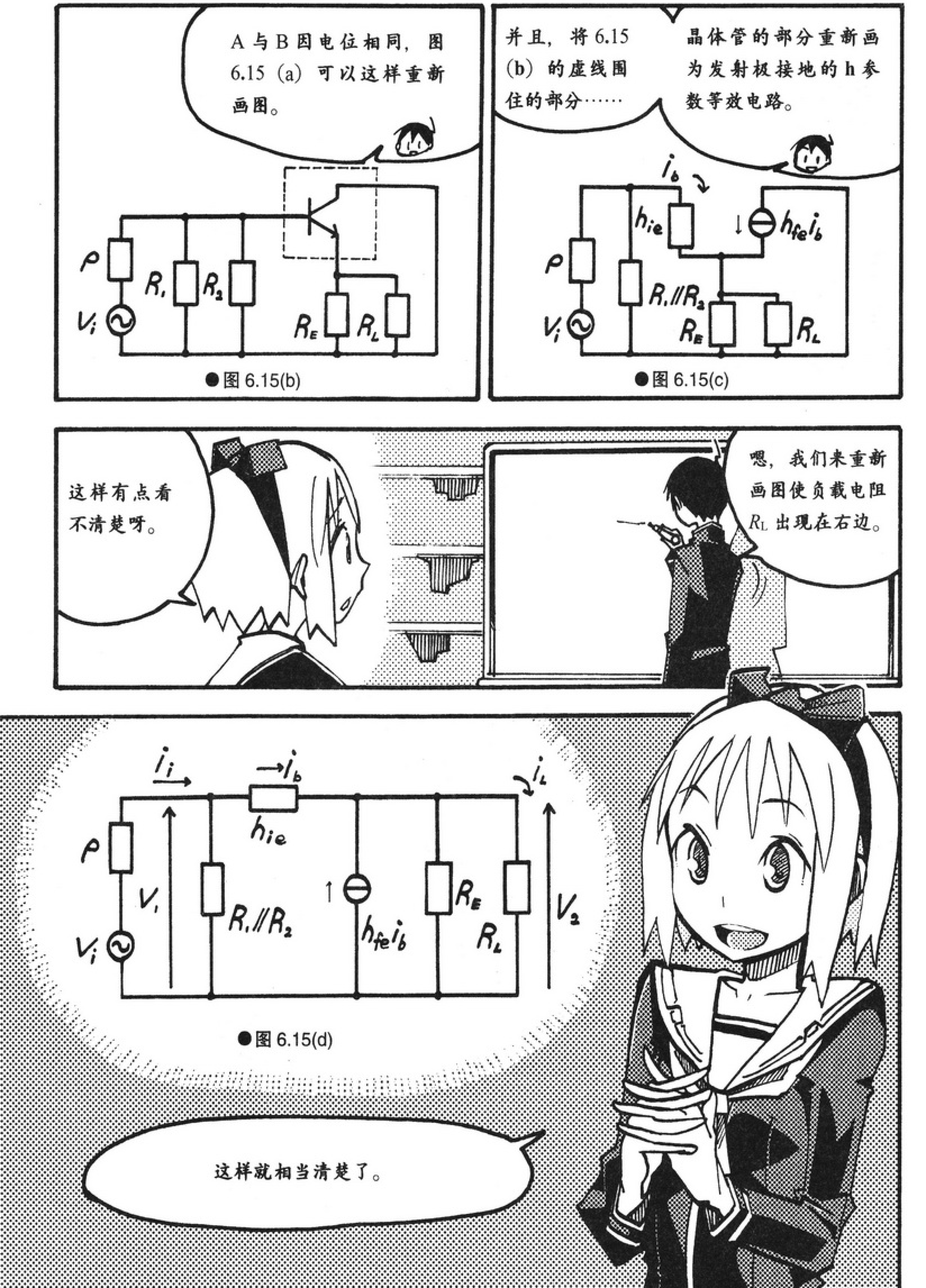
●图 6.13　发射极耦合电路的直流成分

●图 6.14　发射极耦合电路的直流负载线



●图 6.15 发射极耦合电路

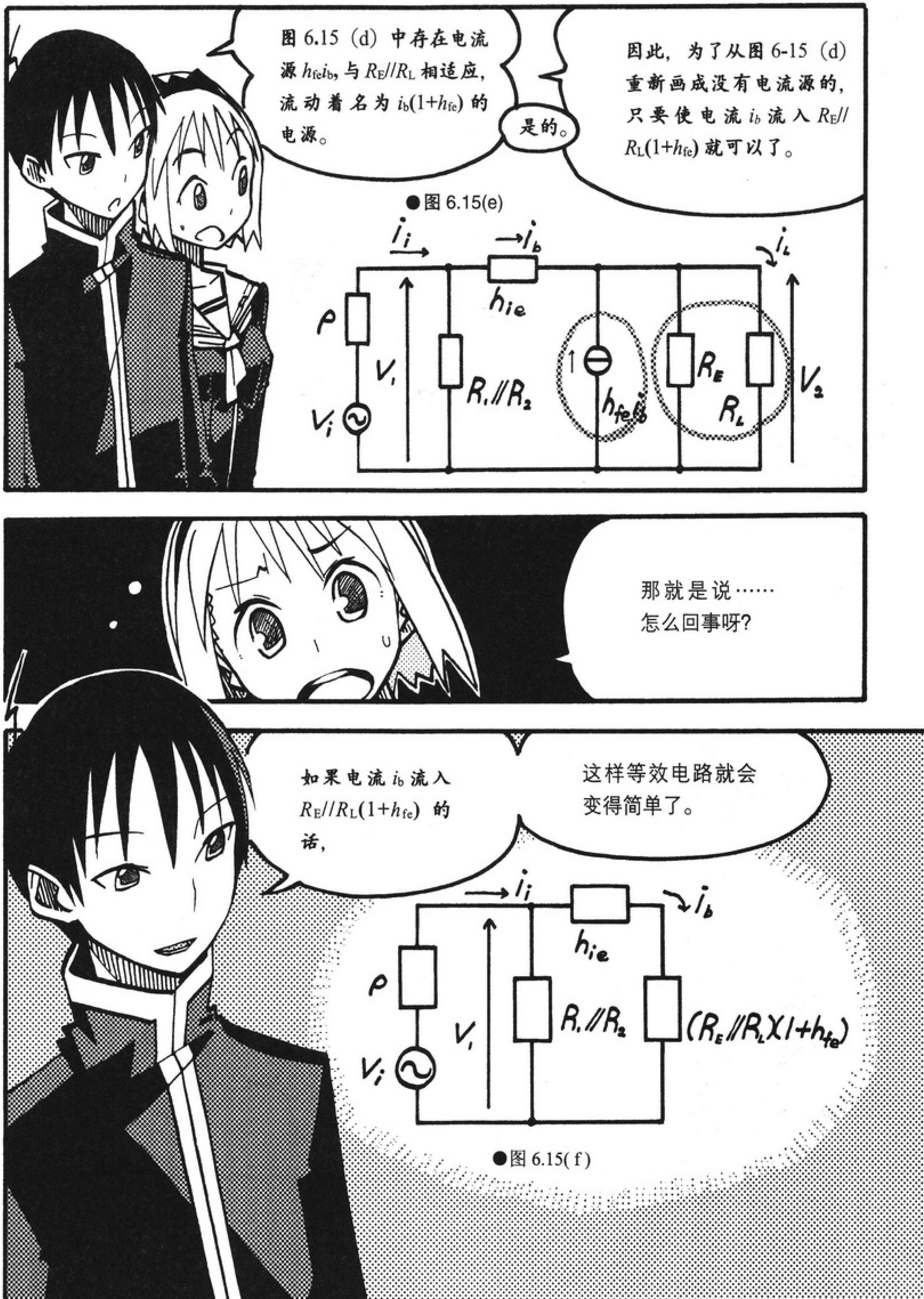
●图 6.15（a）将电容与直流电源看作短路



●图 6.15(b)

●图 6.15(c)

●图 6.15(d)


图 6.15（d）中存在电流源 $h_{fe}i_b$，与 $R_E//R_L$ 相适应，流动着名为 $i_b(1+h_{fe})$ 的电源。
是的。
因此，为了从图 6-15（d）重新画成没有电流源的，只要使电流 i_b 流入 $R_E//R_L(1+h_{fe})$ 就可以了。
i_i i_b i_L ρ h_{ie} V_1 V_i $R_1//R_2$ $h_{fe}i_b$ R_E R_L V_2
那就是说……
怎么回事呀？
如果电流 i_b 流入 $R_E//R_L(1+h_{fe})$ 的话，
这样等效电路就会变得简单了。
i_i i_b ρ h_{ie} V_1 V_i $R_1//R_2$ $(R_E//R_L)(1+h_{fe})$

●图 6.15(e)

●图 6.15(f)



i_i
h_{ie}
V_i
$R_1 /\!/ R_2$
这就是在发射极耦合电路中导出等效电路的方法。
真是变得相当简单了呢。
你记住了吗?
我想我记住了。
这个内容也要结束了。
我们再加一把劲吧。
好的，我会努力的。
噢！


3.4 电压放大率和电流放大率
〈电压放大率〉
接着，我们来求出电流放大率吧。
好的。
但那之前，必须在发射板耦合电路中求出电压放大率。
啊……
在图 6.15（d）中，输入电压为 v_1，输出电压为 v_2，就是说，
i_i
i_b
h_{ie}
ρ
v_i
V_1
$R_1/\!/R_2$
$(R_E/\!/R_L)(1+h_{fe})$
如将其考虑为出现在 $R_E/\!/R_L(1+h_{fe})$ 的电压，电压放大率则
$A_v=\dfrac{v_2}{v_1}\approx 1$
是这样的。
因此，就可以得到与输入信号电压相同的输出信号。
哦！


〈电流放大率〉
我前面讲过电流放大率 A_i 是输入电流 i_i 与流入负荷电阻 R_L 的电流 i_L 之比吧。
是的，那个我还记得。
也就是说，发射极耦合电路中的电流放大率
$A_i=\frac{i_L}{i_i}=1+h_{fe}$
是这样的。
h_{fe} 的值在 50~100 之间，因此将输入信号的电流大小增大 50~100 倍就可以使之变为输出信号。
……
原来如此！
因此它才是放大吧！
嗯！

3.5 输入输出的阻抗(2)

<输入的阻抗 Z_{in}（2）>



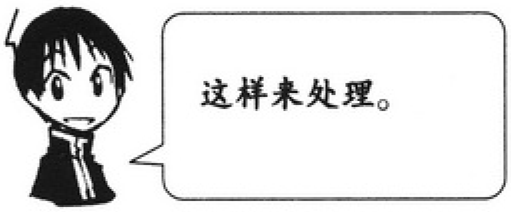

<输出阻抗 Z_{out}（2）>
接下来是输出阻抗。
Oh Yeah!
从图 6.15*(d)* 的 $(1+h_{fe})(R_E//R_L)$ 来看，输出阻抗 Z_{out} 在左侧。
i_i i_b i_L ρ V_i V_1 $R_1//R_2$ h_{ie} $h_{fe}i_b$ R_E R_L V_2
但是，即使 $V_i=0$，也不会是 $i_b=0$，所以输出阻抗 Z_{out} 不会变为无限大。
也就是说，它是这样的。
$Z_{out}=\frac{v_{out}}{i_{out}}=\frac{h_{ie}+\rho//R_1//R_2}{1+h_{fe}}$
$(\approx h_{ib})$
与发射极接地放大电路的输出阻抗相比，发射极耦合电路的输出阻抗 Z_{out} 的值非常小。


因此，输出阻抗作为负荷电阻R_L，与扩音器连接时，会发出足够大的声音。
于是，声音就会出来了啊。
啊
到此，电子电路的基本内容
就结束了。
啊
呀
太好了。
收音机也终于完成了吧！
……
小绫，你的精力也太充沛了吧。

补充知识

与分贝（dB）的关系

那么，关于发射极接地放大电路的电流放大率 A_i



$$A_i=20\lg\left|\frac{i_L}{i_i}\right|$$

这时的单位则为 dB(分贝)。所谓分贝是指信号与噪音之比的 S/N 或用于表示声音强度等的单位。

例如，dB 若为 0，则输入信号与输出信号大小相同，但 dB 若为 20，输出信号的大小是输入信号的 10 倍。dB 若为 40，可以说输出信号的大小为输入信号的 100 倍。

因此，如图 6.1 所示，可以说发射极接地放大电路的电流放大率在 h_{fe}=100 时为 40dB。

为什么发射极耦合电路是必需的

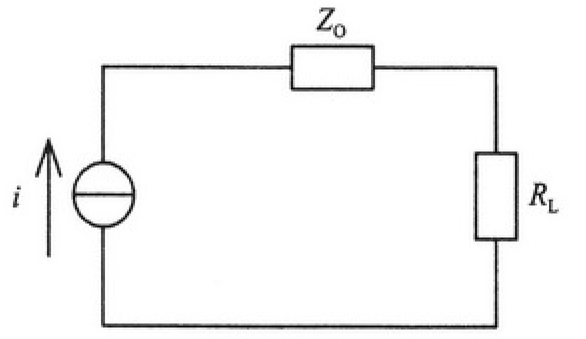
其理由在于：在发射极接地放大电路中，因电阻而消耗的功率为 $P=I^2R$。

也就是说，如图 6.1 所示，输出阻抗 Z_o 与负荷电阻 R_L 形成相连接的状态，但起扩音器作用的负荷电阻 R_L 的大小与输出阻抗相比非常小，因此将流入扩音器及输出阻抗的电流看作一样的话，就可以说扩音器所消耗的电力与输出阻抗所消耗的电力相比则是非常少的。因此，扩音器用来转换声音的能量则几乎没有了。

也就是说，电路整体的能量并不是由扩音器、而是由输出阻抗消耗掉的，因此因扩音器即形成声音的能量而被消耗的电力几乎没有了。

因此，就按照现在这样，声音是不会从扩音器发出来的，所以发射极接地放大电路作为放大电路是不够的。

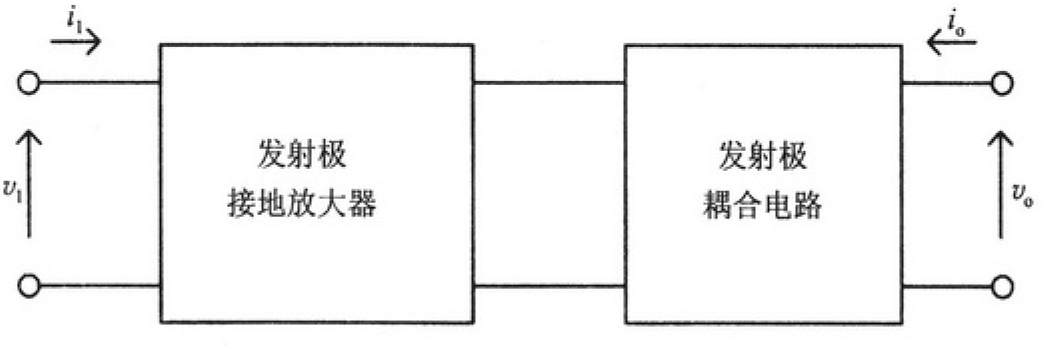
顺便一提，一般认为扩音器的一般阻抗的大小为 8 Ω，而发射极接地放大电路的输出阻抗的实用数值则为 300k Ω。



●图6.A1　输出阻抗Z_O与负荷电阻R_L

将发射极耦合电路级联连接

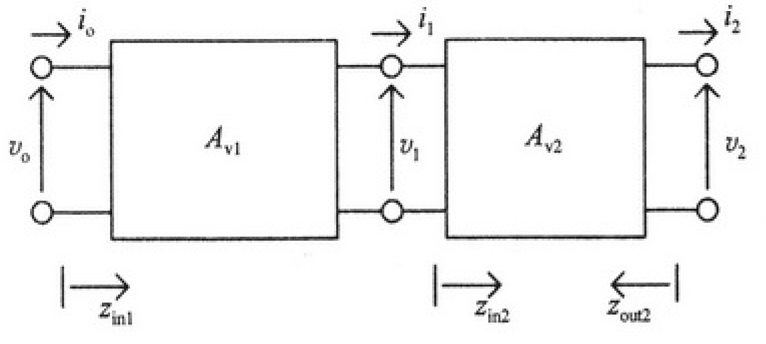
如图 6-A2 所示，将发射极接地放大电路与发射耦合电路连接时，整体的电流放大率用发射极接地放大器的电流放大率与发射极耦合电路的电流放大率的乘积来表示。因此，各自的电流放大率即使为 100 时，2 个相乘则成为 10000，因此可了解其作为放大率是非常大的。



●图6.A2　发射极接地放大电路与发射极耦合电路的级联连接

放大器的级联连接

在本章中，利用放大器说明了级联连接发射极接地放大电路与发射极耦合电路的内容。下面来说明电流放大率、输入阻抗、输出阻抗的情况。

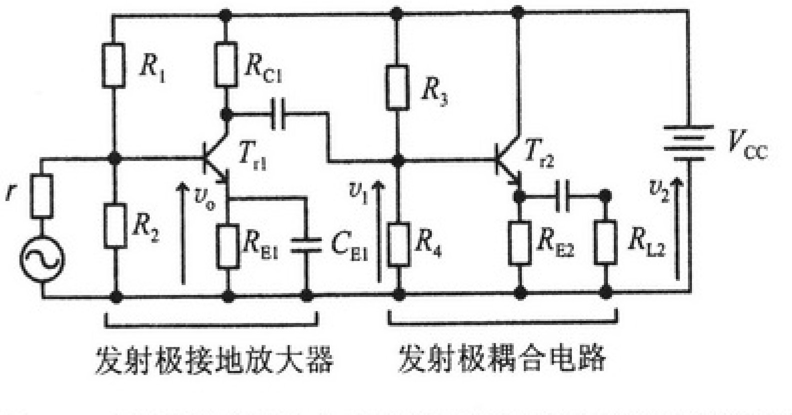


●图6.A3　放大器的级联连接的概念

图 6.A3 时的电流放大率公式可以表示为

$$A_i=\frac{i_2}{i_0}=\frac{i_1}{i_0}\cdot\frac{i_2}{i_1}=A_{i1}\cdot A_{i2}$$

它是用第 1 级放大器的放大率与第 2 级放大器的放大率的乘积来表示的。



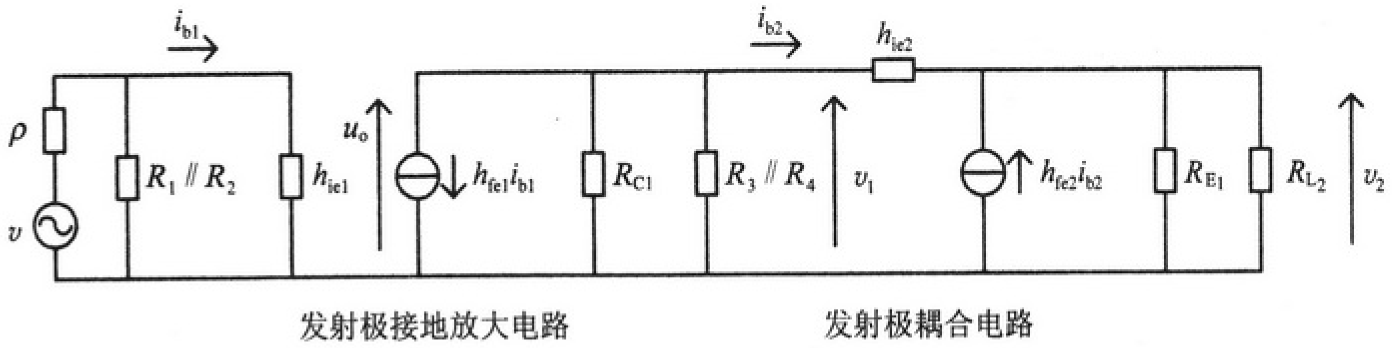
●图6.A4　发射极接地放大电路与发射极耦合电路的级联连接

因此，如图 6-A4 所示，在发射极接地放大电路与发射极耦合电路的级联连接电路中

级联连接电路的电压放大率 = 发射极接地放大电路的电压放大率

× 发射极耦合电路的电压放大率

的关系近似成立。这个说“近似”的理由在于：其各自的输入阻抗、输出阻抗、偏压电阻都是有限的，所以并不意味着完全一样。



●图6.A5　图6.A4的交流等效电路

在此电路中，若着眼于发射极接地放大电路，发射极耦合电路的输入阻抗定为 Z_{ic1}, 则

$$i_0=i_{b1}$$

$$i_1=i_{b2}=-h_{fe1}i_{b1}\frac{R_{c1}//R_3//R_4}{R_{c1}//R_3//R_4+Z_{ic1}}$$

$$A_{i1}=\frac{i_1}{i_0}=-h_{fe1}\frac{R_{c1}//R_3//R_4}{R_{c1}//R_3//R_4//Z_{ic1}}$$

因此，严格来讲，此 A_{i1} 与发射极接地放大电路求得的 A_i 并不一致，只是，$R_{c1}//R_3//R_4>>Z_{ic1}$ 时，可以看作 $A_{i1}=-h_{fe}$。

同时，关于发射极耦合电路的部分如前所述，$A_{i2}=1+h_{fe}$。因此，此级联连接电路的电流放大率 A_i 为

$$A_i=A_{i1}A_{i2}=-h_{fe1}(1+h_{fe2})\frac{R_{c1}//R_3//R_4}{R_{c1}//R_3//R_4+Z_{c1}}\approx-h_{fe1}(1+h_{fe2})$$

可以说这是各自放大器的放大率的乘积。

输入阻抗与在输入一侧连接的发射极接地放大电路的输入阻抗大致是相同的数值。一般认为其数值为 3kΩ 左右。

输出阻抗与在输出一侧连接的发射极耦合电路的输出阻抗大致是相同的数值。一般认为其数值为 35Ω 左右。

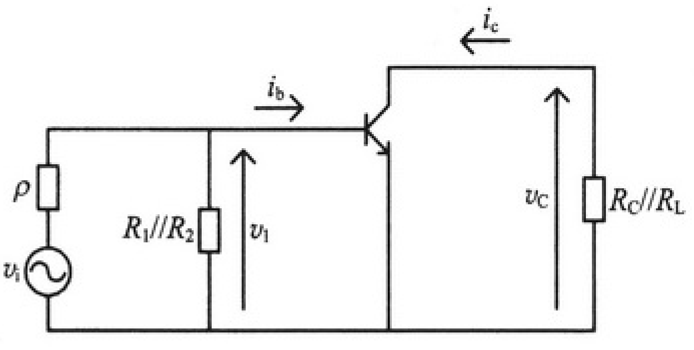
放大器的高频特性

本章在放大器的分析上，对电容做了以下的近似。

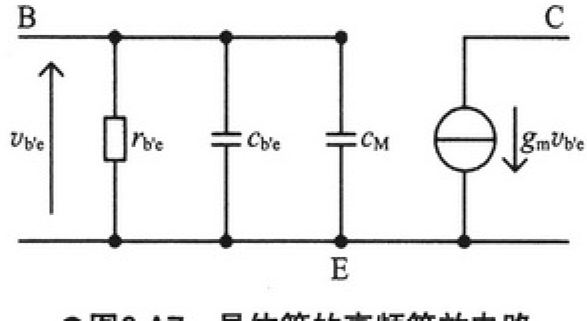
① 关于直流电，因角频率 w=0, 将阻抗定为∞。

② 假定电容的容量非常大，将交流电的阻抗定为 0（换言之，将电容的部分看作短路）。

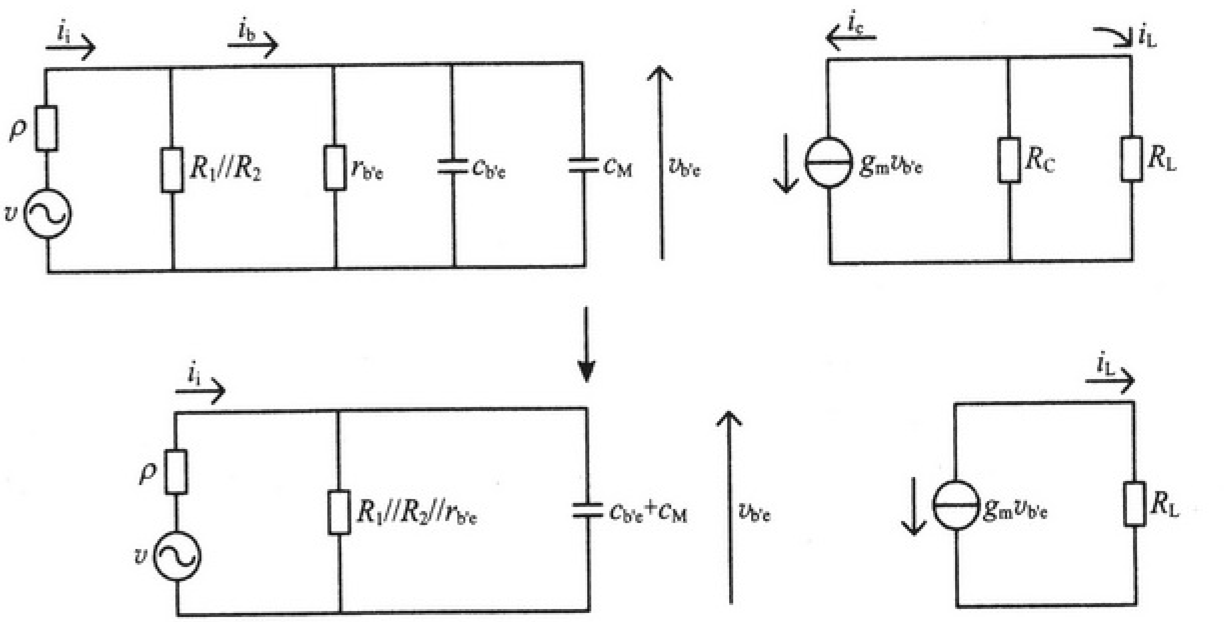
这两个近似，在电子电路的分析中有很重要的意义，也是为了使其分析更简单。但是，这些近似是有范围的。一般如果交流电的频率非常高，在晶体管的内部中空乏层明显起着电容的作用，换言之，普遍认为寄生容量的效果是不能忽视的。因此，在放大器的等效电路中安装起因于寄生容量的电容，则必须考虑放大率等因素。



●图6.A6　发射极接地放大电路的交流电成分



●图6.A7　晶体管的高频等效电路



●图6.A8　发射极接地放大电路的高频等效电路（$R_c>>R_L$）

例如，在如图 6.A6 所示的发射极接地放大电路中，将晶体管的部分替换为如图 6.A7 所示的含有寄生容量的高频等效电路，则如图 6.A8 所示，等效电路之中则会包含电容器。图 6.A7 的晶体管的高频等效电路中，$C_{b'e}$ 为基极与发射极之间的寄生容量，在 C_M 基极与集电极之间的寄生容量中与镜子效应互相结合所形成的容量。这时的电流放大率 A_i 可以表示为如下的公式。

$$i_i=\left(\frac{1}{R_1//R_2//r_{b'c}}+j_W(C_{b'c}+C_M)\right)v_{b'e}$$

$$i_L=-g_m v_{b'e}\frac{R_c}{R_c+R_L}\approx -g_m v_{b'e}(\because R_c>>R_L)$$

$$A_i=\frac{-g_m(R_1//R_2//r_{b'e})}{1+j_W(C_{b'c}+C_M)(R_1//R_2//r_{b'e})}$$

仔细看 A_i 的话，它为角频率 w 的函数为

$$\omega=\frac{1}{(C_{b'e}+C_M)(R_1//R_2//r_{b'e})}$$

如上所述，A_i 的大小 $|A_i|$ 可以急剧减小。这样，如变为高频，换言之，如角频率 ω 增大，则会产生电流放大率降低的问题。这里所说的高频是指频率比声音也大很多的信号。因此，用调谐放大器处理的信号是如想接收频道的电波频率一样的高频信号，因此才将晶体管作为高频等效电路来处理。再者，本章中所描述的发射极接地放大电路或发射极耦合电路，因处理的是声音频率程度的信号，所以高频特性不成为问题。


终于做好了。
是的……
嗯……
学长……
我可以再来参加社团活动吗？
当然，
你为什么这么问？
我，喜，喜，喜欢。
喜欢！



如果与你一起的话，社团活动会非常好。今后请多关照……
唉？！
你真是相当喜欢电子电路的内容呢。
你还是感觉困扰吗？
我喜欢的是学长呀！！！
笨蛋！！！
啪
！！？
唉？


呃
这是什么感觉！？
一见钟情！
怎么了？
我……
一直喜欢你。
……


呀——
呀
原来是这样啊
对，对不起啊！
我这方面比较迟钝。
所以，那个
但如果与你一起的话……
我感觉会相处得很好。
学长……


如果你不介意这样的我，
学长……
我们两个人开开心心地进行社团活动吧。
呀呀呀呀呀
呀
啊！？
小绫，脖，脖子……


小绫的家
SENPAI
噗耶
抱着它睡觉的话，就能梦到你吧……
SENPAI
这个杯子
可爱吧……
什么啊……

（TM-0519.0102）
责任编辑：王 炜 赵丽艳
责任制作：董立颖 魏 谨
封面制作：许思麒

用漫画这种形式讲数学、物理和统计学，十分有利于在广大青少年中普及科学知识。

周恩来、邓颖超秘书，周恩来邓颖超纪念馆顾问
中日友好协会理事，《数理天地》顾问，全国政协原副秘书长

用漫画和说故事的形式讲数学，使面貌冷峻的数学变得亲切、生动、有趣，使学习数学变得容易，这对于提高全民的数学水平无疑是功德无量的事。

《数理天地》杂志社 社长 总编
“希望杯”全国数学邀请赛组委会 命题委员会主任

用漫画的形式，讲解日常生活中的数学、物理知识，更能让大家感受到数学殿堂的奥妙与乐趣。

《光明日报》原副总编辑
中华炎黄文化研究会 常务副会长

科学漫画是帮助学习文科的人们用形象思维的方式掌握自然科学的金钥匙。

中国人民大学外语学院日语专业 主任
大学日语教学研究会 会长

在日本留学的时候，我在电车上几乎每次都能看到很多年轻的白领看这套图书，经济实惠、图文并茂、浅显易懂，相信这套图书的中文版也一定会成为白领们的手中爱物。

大连理工大学 能源与动力学院 博士 副教授

我非常希望能够在书店里看到这样的书：有人物形象、有卡通图、有故事情节，当然最重要的还有深厚的理工科底蕴。我想这样的书一定可以大大提升孩子们的学习兴趣，降低他们对于高深的理工科知识的恐惧感。

北京启明星培训学校 校长

书中的数学知识浅显实用，漫画故事的形式使知识贴近生活，概念更容易理解。

北京大学 数学科学学院 博士

上架建议：科普/漫画

ISBN 978-7-03-027107-5

9 787030 271075 >

定价：32.00元

科学出版社 东方科龙
http://www.okbook.com.cn
zhaoliyan@mail.sciencep.com